

"MEDIDA DE BIRREFRINGÊNCIA E SUA DIMINUIÇÃO POR
ROTAÇÃO DA PREFORMA EM FIBRAS ÓPTICAS MONOMODO"

DANILO CÉSAR DINI

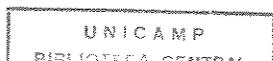
Orientador: PROF. DR. EVANDRO CONFORTI

Este exemplar cor-
responde à redação
final da tese defen-
dida por Danilo
César Dini e apro-
vada pela Comissão
Julgadora em 08/12/88
Evandro Conforti

Tese apresentada à Faculdade
de Engenharia Elétrica, da
Universidade Estadual de
Campinas - UNICAMP - como
parte dos requisitos exigidos
para obtenção do Título de
MESTRE EM CIÊNCIAS.

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA ELÉTRICA
DEPARTAMENTO DE MICROONDA E ÓPTICA

DEZEMBRO 1988



A G R A D E C I M E N T O S

- Ao Prof. Dr. Evandro Conforti pela orientação e valiosa ajuda dada durante este trabalho.
- Ao Dr. César Augusto por Deus Évora, Coordenador da Área de Fibras Ópticas - CPqD - TELEBRÁS, pelo grande apoio e enorme estímulo dados no transcorrer deste trabalho.
- Ao João Batista de Melo Ayres Neto, do CPqD - TELEBRÁS pelas valiosas discussões.
- Ao Prof. Dr. Geraldo Ferreira Mendes, do Instituto de Física da UNICAMP, pelos incentivos para a realização do Mestrado.
- Ao Robinson, Amauri e Marco pela confecção das preformas.
- Ao José Pedro, Mário e Davi pelo auxílio durante o puxamento das fibras.
- Ao Roberto, João Mendes e Júlio pela colaboração.
- A todo pessoal da Coordenação de Área de Fibras Ópticas -CPqD- TELEBRÁS que, de várias formas, auxiliaram na realização deste trabalho.
- À Márcia e à Simone pelos trabalhos de datilografia.
- À TELEBRÁS, pela oportunidade e suporte.

À minha esposa Wanda
pela paciência e compreensão.

A meus filhos Ricardo César
e Nádia Cristina.

À minha mãe Esterlina.

R E S U M O

Apresentam-se os resultados obtidos na caracterização do comprimento de batimento e, portanto, da Birrefringência Modal em fibras ópticas monomodo de alta birrefringência.

O trabalho discute as montagens ópticas necessárias para a realização das medidas do comprimento de batimento utilizando-se três métodos: método do espalhamento Rayleigh, método da varredura em frequência e método do corte. Além disso, medidas do grau de polarização na saída da fibra foram realizadas.

Apresentam-se, também, os resultados dos retardos medidos em fibras ópticas monomodo de baixa birrefringência, obtidas por rotação da preforma. Essas fibras foram desenvolvidas especialmente para este trabalho, tendo sido comparadas com fibras da mesma preforma obtidas com puxamento feito sem a rotação da preforma.

O sistema de rotação da preforma, desenvolvido para o puxamento das fibras ópticas, é também descrito. A influência deste processo de fabricação nas propriedades das fibras obtidas foi avaliado através das medidas de geometria e de atenuação espectral.

Finalmente, a partir da utilização do modelo teórico de Barlow et al., mostra-se o efeito da rotação da preforma no retardo apresentado por essas fibras.

A B S T R A C T

The results obtained in the characterization of the beat length and, therefore, of the Modal Birefringence in high-birefringence single-mode optical fibers are presented.

The work discusses the optical mountings used for making the measurements of the beat length using three methods: Rayleigh scattering method, the frequency-sweeping method and the cut-back method. Besides this, measurements of the degree of polarization at the fiber output were made.

Also the results of measurement of retardation in low-birefringence single-mode optical fibers, obtained by spinning the preform are presented. Such fibers were developed specially for this work, and the results were compared with fibers obtained from the same preform by a drawing process without spinning the preform.

The apparatus developed for spinning the preform during the drawing process of the optical fiber is also described. The influence of this fabrication process on the properties of the fibers obtained was evaluated by geometrical and spectral attenuation measurements.

Finally, using the theoretical model of Barlow et al., we show the effect of the preform spinning on the retardation presented by these fibers.

Í N D I C E

PREFÁCIO	1
CAPÍTULO 1 - BIRREFRINGÊNCIA EM FIBRAS ÓPTICAS MONOMODO	
1.1 - Introdução	4
1.2 - Definições básicas	4
1.3 - Birrefringência devido a tensões mecânicas	7
1.4 - Birrefringência devido à forma	13
1.5 - Birrefringência devido a efeitos externos	16
CAPÍTULO 2 - FIBRAS ÓPTICAS MONOMODO DE ALTA BIRREFRINGÊNCIA (FOAB)	
2.1 - Introdução.....	18
2.2 - Tipos existentes de FOAB	19
2.3 - Caracterização das fibras utilizadas ...	23
2.4 - Medida do grau de polarização	26
CAPÍTULO 3 - MÉTODOS PARA MEDIDA DO COMPRIMENTO DE BATIMENTO EM FIBRAS ÓPTICAS MONOMODO DE ALTA BIRREFRINGÊNCIA	
3.1 - Introdução	34
3.2 - Método do espalhamento Rayleigh	36
3.3 - Método da varredura em frequência.....	40
3.4 - Método do corte	56

CAPÍTULO 4 - FABRICAÇÃO DE FIBRAS ÓPTICAS MONOMODO DE BAIXA	
BIRREFRINGÊNCIA POR ROTAÇÃO DA PREFORMA	
4.1 - Introdução	62
4.2 - Preparação da preforma	63
4.3 - Torre de puxamento	70
4.4 - Descrição do sistema de rotação	74
4.5 - Puxamento das fibras monomodo de baixa	
birrefringência	78
CAPÍTULO 5 - MODELAMENTO TEÓRICO DA FIBRA DE BAIXA BIRREFRIN	
<u>GÊNCIA</u> POR ROTAÇÃO DA PREFORMA	
5.1 - Introdução	84
5.2 - Modelo teórico	84
CAPÍTULO 6 - CARACTERIZAÇÃO DAS FIBRAS OBTIDAS POR ROTAÇÃO	
DA PREFORMA	
6.1 - Introdução	93
6.2 - Caracterização geométrica	94
6.3 - Medidas de atenuação e do comprimento de	
onda de corte	97
6.4 - Medidas da Birrefringência	105
CAPÍTULO 7 - CONCLUSÕES	123
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	126

PREFÁCIO

Fibras ópticas monomodo estão sendo utilizadas em sistemas de comunicações ópticas devido à sua alta capacidade de transmissão e baixa perda do sinal transmitido.

O esquema de modulação/demodulação empregado nos sistemas atuais é o esquema IM/DD (Modulação de Intensidade/Deteção Direta) que tem como grandes vantagens a simplicidade do sistema e o baixo custo ^{|1|}. Este esquema não faz uso da fase da portadora, além do sinal ser detectado por um fotodiodo insensível à polarização ou fase ^{|2|}.

Existem algumas aplicações de comunicação por fibra óptica nas quais a fase e polarização do campo propagante precisam ser conhecidas, como em Sistemas de Comunicação Óptica Coerente, que poderão aumentar significativamente a capacidade e distância de transmissão dos sinais por fibra óptica ^{|1|}, como também em sensores interferométricos a fibras ópticas em que a polarização precisa ser mantida ^{|2|}.

A evolução do estado de polarização do campo eletromagnético em uma fibra óptica é descrita em termos da Birrefringência Modal, que é a diferença de índice de refração efetivo para os dois estados ortogonalmente polarizados do modo fundamental.

As fibras atuais utilizadas em telecomunicações não mantêm o estado de polarização de entrada após alguns metros de fibra, sendo necessário, em várias aplicações, o desenvolvimento de fibras que mantenham a polarização ^{|2|}. Estas fibras são as chamadas Fibras Ópticas Birrefringentes e estão sendo desenvolvidas seguindo duas estratégias.

A primeira envolve a utilização de fibras que forçosamente conservam o estado de polarização linear, à semelhança de guias

elípticos em microondas e são as Fibras de Alta Birrefringência.

A segunda prevê o uso de fibras de baixíssima birrefringência de forma a manter campos em polarização cruzada num valor inferior a determinado limite (normalmente - 20 dB) e são as Fibras de Baixa Birrefringência.

A caracterização da birrefringência nas fibras monomodo atuais também se torna importante, já que a birrefringência pode ser o fator limitante nos sistemas de comunicações de alta capacidade atualmente utilizados devido à dispersão de polarização entre os dois modos ortogonais de mais baixa ordem ^[3].

Neste trabalho procurou-se primeiro fazer uma retrospectiva do efeito da birrefringência em fibras ópticas monomodo. Para tanto são apresentadas no Capítulo 1 as definições de alguns parâmetros de fibras ópticas monomodo que foram utilizados. Em seguida são mostrados os mecanismos responsáveis pela birrefringência na fibra, procurando apenas evidenciar os parâmetros que devem ser controlados para se evitar ou aumentar a birrefringência.

No Capítulo 2 são apresentados alguns tipos de fibra de alta birrefringência já desenvolvidos no exterior, descrevendo seu processo de fabricação. São mostrados também os resultados da caracterização geométrica das fibras que foram utilizadas no transcurso do trabalho. O uso da medida do grau de polarização na saída da fibra quando da variação do ângulo de incidência de uma luz linearmente polarizada é uma importante ferramenta para o entendimento da evolução do estado de polarização ao longo da fibra.

No Capítulo 3 são mostrados os três métodos utilizados neste trabalho para a caracterização do comprimento de batimento e, portanto, da Birrefringência Modal em fibras ópticas. Os métodos do espalhamento Rayleigh e da varredura em frequência foram utilizados

nas fibras de alta birrefringência, enquanto que o método de corte foi apresentado neste capítulo de forma teórica, sendo muito utilizado na caracterização das fibras obtidas e cujos resultados são apresentados no Capítulo 6.

No Capítulo 4 é descrito o processo para a fabricação de uma fibra óptica monomodo de baixa birrefringência, realizado durante este trabalho. O método utilizado consistiu na rotação da preforma durante o puxamento da fibra; apresenta-se também o sistema construído para esta finalidade bem como os cuidados tomados na confecção deste tipo de fibra.

No Capítulo 5 é mostrado o modelo teórico de A.J.Barlow et al., utilizado para as fibras ópticas monomodo fabricadas por rotação da preforma. Apresenta-se também os resultados teóricos do retardo a partir dos parâmetros usados nas fibras fabricadas.

No Capítulo 6 são mostrados os resultados conseguidos na caracterização das fibras obtidas por rotação da preforma. Foram realizadas caracterizações da geometria e atenuação que poderiam ser afetadas por este processo bem como a caracterização da birrefringência nestas fibras.

As conclusões extraídas dos capítulos anteriores são apresentadas no Capítulo 7.

CAPÍTULO 1 : BIRREFRINGÊNCIA EM FIBRAS ÓPTICAS MONOMODO

1.1. INTRODUÇÃO

O conhecimento dos parâmetros que causam o aumento da birrefringência em uma fibra é importante para evitá-los durante a sua fabricação. Os dois mecanismos que introduzem birrefringência na fabricação são: a) tensões mecânicas assimétricas residuais ou criadas propositalmente em volta do núcleo, as quais criam birrefringência devido ao efeito fotoelástico; b) a própria forma do núcleo, quando a simetria cilíndrica do núcleo da fibra é quebrada.

Já a birrefringência devido às ações externas (força lateral, curvaturas, etc) é aqui apresentada sem maior rigor matemático visto que somente pretende-se eliminar esses efeitos durante a caracterização das fibras ópticas de baixa birrefringência, já que estas são mais sensíveis a essas ações.

1.2. DEFINIÇÕES BÁSICAS

Uma fibra óptica é um guia de onda dielétrico na forma cilíndrica, consistindo de um núcleo central de índice de refração n_1 envolto por uma casca de índice de refração n_2 menor que n_1 ^[4].

A estrutura de uma fibra óptica de índice de refração ideal é mostrada na Fig. 1.1 onde o índice de refração $n(r)$ em função da distância radial r é dado por

$$n(r) = n_1 \quad 0 < r < a \quad (1.1)$$

$$n(r) = n_2 \quad r > a \quad (1.2)$$

onde a é o raio do núcleo.

A diferença de índice de refração entre o núcleo e a casca é dada por:

$$\Delta n = n_1 - n_2 \quad (1.3)$$

As fibras ópticas monomodo de sílica ($n_2 = 1,457$) possuem Δn entre 1×10^{-3} a 5×10^{-3} , correspondendo a $\Delta < 1\%$, onde Δ é a diferença relativa de índice de refração e é dada por

$$\Delta \approx (n_1 - n_2)/n_1 \quad (1.4)$$

Um importante parâmetro utilizado em fibras ópticas monomodais é a frequência normalizada V ⁵, que é definida em termos dos parâmetros físicos da fibra como

$$V = \frac{2\pi}{\lambda} a (n_1^2 - n_2^2)^{1/2} \quad (1.5)$$

onde

λ = comprimento de onda da luz.

Para valores de $V < 2,405$, em uma fibra perfeitamente circular e livre de tensões assimétricas, somente os dois modos HE_{11} (um polarizado ao longo de O_x e outro polarizado ao longo de O_y em um sistema cartesiano xyz) podem propagar. Estes dois modos HE_{11}^x e HE_{11}^y são degenerados, isto é, eles têm a mesma constante de propagação de fase β , portanto o regime é monomodo nestas condições.

As fibras monomodo atualmente fabricadas possuem imperfeições, como não circularidade do núcleo e tensões assimétricas, que degradam esta simetria circular da fibra ideal, produzindo uma distribuição anisotrópica do índice de refração na região do núcleo. Neste caso a fibra comporta-se como um meio birrefringente devido à diferença efetiva dos índices de refração sendo que os

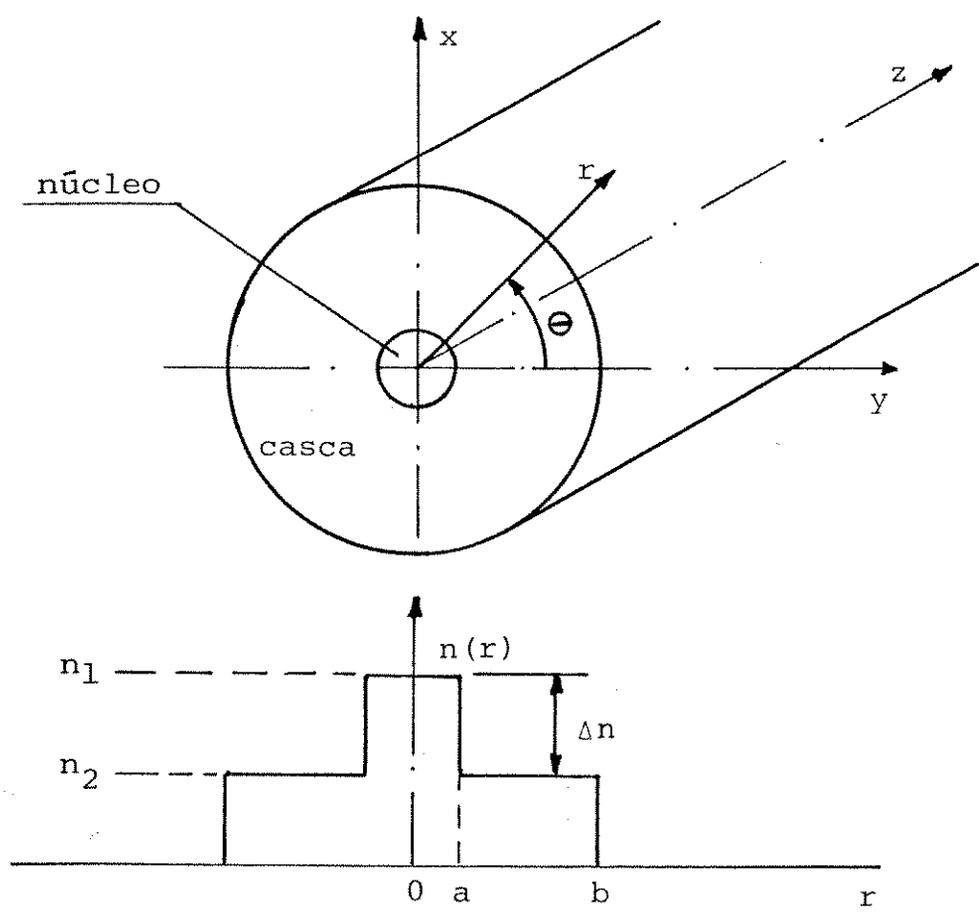


FIG. 1.1 - Estrutura e perfil de índice de refração de uma fibra óptica de índice degrau ideal.

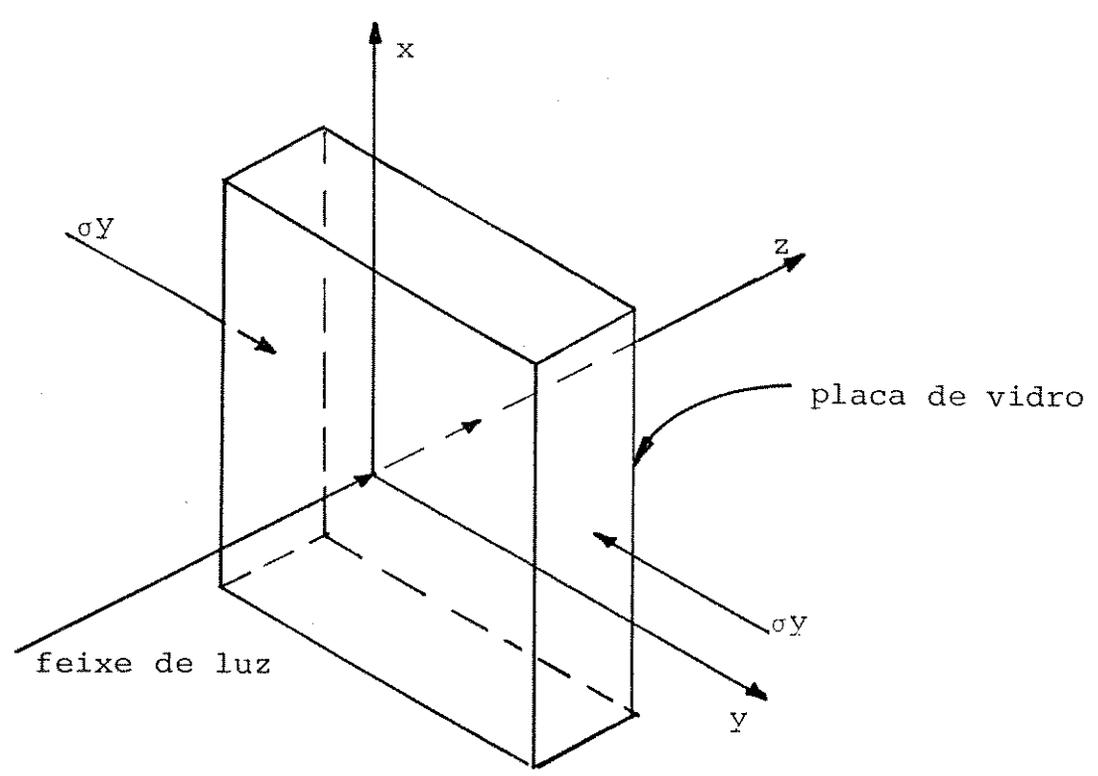


FIG. 1.2 - Obtenção do efeito da birrefringência em vidro.

eixos principais x e y são determinados pela simetria dos elementos em uma secção transversal da fibra. Portanto os modos poderão ter diferentes constantes de propagação de fase β_x e β_y .

Quando a secção transversal da fibra \tilde{e} é independente da direção z , ao longo do comprimento L , a Birrefringência Modal B é dada por

$$B = (\beta_x - \beta_y) \lambda / 2\pi \quad (1.6)$$

Se considerarmos uma onda monocromática linearmente polarizada propagando na direção z , em uma fibra como dada anteriormente, as componentes do campo elétrico E_x, E_y dessa onda serão expressas por

$$E_x = A_x \cos (\omega t - \beta_x z) \quad (1.7)$$

$$E_y = A_y \cos (\omega t - \beta_y z) \quad (1.8)$$

onde:

ω = frequência angular

β_x, β_y = constante de propagação de fase na direção x, y

A_x, A_y = amplitude máxima na direção x, y .

1.3. BIRREFRINGÊNCIA DEVIDO A TENSÕES MECÂNICAS

Em um material isotrópico no estado não deformado a polarização induzida é dada por

$$\vec{P} = \epsilon_0 \chi \vec{E} \quad (1.9)$$

onde:

ϵ_0 = permissividade do vácuo

$\chi = \frac{\epsilon}{\epsilon_0} - 1$ = susceptibilidade elétrica do material

\vec{E} = campo elétrico

Neste caso χ é uma quantidade escalar e, portanto, o meio tem o mesmo índice de refração $n = (\chi+1)^{1/2}$, independente da direção de polarização da luz ^[6]. Quando o meio estiver sobre a influência de uma pressão tornando-o anisotrópico, a magnitude da polarização \vec{P} varia com a direção de polarização da luz incidente e, conseqüentemente χ deve ser expresso como um tensor.

A magnitude dos coeficientes χ_{ij} deste tensor depende da escolha dos eixos x, y, z do sistema cartesiano relativo à estrutura do meio. É sempre possível escolher os eixos x, y e z de tal forma que os elementos fora da diagonal sejam eliminados deixando:

$$P_x = \epsilon_0 \chi_{11} E_x \quad (1.10)$$

$$P_y = \epsilon_0 \chi_{22} E_y \quad (1.11)$$

$$P_z = \epsilon_0 \chi_{33} E_z \quad (1.12)$$

Essas direções são chamadas de eixos principais do meio dielétrico. Se considerarmos uma onda propagando ao longo de z e se o campo elétrico estiver polarizado paralelo a x ele induzirá somente P_x e, conseqüentemente, estará propagando-se com índice de refração $n_x = (\chi_{11} + 1)^{1/2}$. De outro lado, se a onda tiver campo elétrico polarizado paralelamente a y , irá propagar-se em um meio com índice de refração $n_y = (\chi_{22} + 1)^{1/2}$. Com isso as constantes de propagação de fase nas direções x e y serão $\beta_x = kn_x$ e $\beta_y = kn_y$, respectivamente.

Portanto alguns materiais transparentes e isotrópicos quando são submetidos a tensões mecânicas podem se tornar birrefringentes. Este fenômeno conhecido como efeito fotoelástico é devido à

deformação elástica que muda o arranjo dos átomos pela influência da tensão sobre o material ^[7].

Se considerarmos um feixe de luz ao longo do eixo z, atravessando uma placa de vidro conforme mostrado na Fig. 1.2, sob a influência de uma tensão de compressão σ_y aplicada no eixo y, os índices de refração do vidro nos eixos x e y podem ser definidos como ^[8]

$$n_x - n = C_2 \sigma_y \quad (1.13)$$

$$n_y - n = C_1 \sigma_y \quad (1.14)$$

onde

n = índice de refração do vidro sem tensão

n_y = índice de refração no eixo y

n_x = índice de refração no eixo x

C_1 = coeficiente de tensão óptica no eixo y

C_2 = coeficiente de tensão óptica no eixo x.

Para a sílica fundida $C_1 = - 6,7 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{kg}$ e $C_2 = - 4,11 \times 10^{-11} \text{ m}^2/\text{kg}$ ^[9].

A diferença entre os dois coeficientes é o coeficiente relativo de tensão óptica ou coeficiente fotoelástico e é dado por

$$C = C_2 - C_1 = \frac{n_x - n_y}{\sigma_y} \quad (1.15)$$

Para o vidro de sílica fundida $C = - 3,44 \times 10^{-11} \text{ m}^2/\text{kg}$ ^[9].

Os materiais utilizados na fabricação de fibras ópticas possuem diferentes coeficientes de expansão térmica. Com isso é possível construir-se fibras com diferentes tensões internas através da deposição ou inserção assimétrica desses materiais em

torno do núcleo. Na Fig. 1.3 é mostrado um exemplo desse tipo de fibra.

Várias análises foram utilizadas para calcular a contribuição das tensões na Birrefringência Modal para as mais diversas estruturas de fibra^{|3|,|4|,|11|,|12|}. Dentre elas é apresentada a de um guia retangular (Fig. 1.4) onde uma fina camada da estrutura núcleo/casca depositada é envolta por duas grossas camadas do substrato de sílica^{|3|}, tendo somente birrefringência devido a tensões B_s . Neste caso B_s é dado por

$$B_s = - EC(\alpha_1 - \alpha_2) (T_1 - T_0) \quad (1.16)$$

onde

E = Módulo de Young da sílica = $7,75 \times 10^9$ kg/m²

C = coeficiente fotoelástico da sílica = $- 3,44 \times 10^{-11}$ m²/kg

α_1 = coeficiente de expansão térmica da estrutura núcleo/casca

α_2 = coeficiente de expansão térmica do substrato

T_1 = temperatura de amolecimento da estrutura núcleo/casca

T_0 = temperatura ambiente

A temperatura T_1 é difícil de estimar pois é dependente da velocidade com que o vidro é esfriado^{|10|}. Uma temperatura apropriada para usar é a temperatura de amolecimento T_s , que para a sílica fundida $T_s = 1.667^\circ\text{C}$ ^{|8|}. No caso de vidros binários ($\text{B}_2\text{O}_3 - \text{SiO}_2$), foi aqui utilizado um valor estimado tal que $T_1 - T_0 \sim 800^\circ\text{C}$ ^{|10|}.

O coeficiente de expansão térmica é aproximadamente uma função linear da concentração do dopante. No caso da sílica dopada com um dopante d , podemos escrever^{|4|}

$$\alpha((d)) = (d)\alpha_d + |1 - (d)| \alpha_o \quad (1.17)$$

onde

(d) = concentração molar do dopante d

α_d = coeficiente de expansão térmica do dopante

α_o = coeficiente de expansão térmica da sílica.

Os valores dos coeficientes térmicos dos materiais utilizados na fabricação de fibras ópticas são ^[4]

$$\text{SiO}_2 = 5 \times 10^{-7} / ^\circ\text{C}$$

$$\text{GeO}_2 = 7 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$$

$$\text{P}_2\text{O}_5 = 14 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$$

$$\text{B}_2\text{O}_3 = 10 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$$

Vamos considerar para esta análise um guia de onda com a estrutura acima definida, onde a casca depositada seja dopada com 10 mol % de B_2O_3 e o substrato de SiO_2 . Utilizando-se dos valores dados anteriormente pode-se calcular o coeficiente de expansão térmica da casca depositada α_1 .

$$\alpha_{\text{B}_2\text{O}_3 - \text{SiO}_2} = 0,1 \alpha_{\text{B}_2\text{O}_3} + |1 - 0,1| \alpha_{\text{SiO}_2}$$

$$\alpha_{\text{B}_2\text{O}_3 - \text{SiO}_2} = 1,45 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$$

A Birrefringência Modal devido à tensão calculada é $2,0 \times 10^{-4}$ para $\Delta T = 800^\circ\text{C}$ e $(\alpha_1 - \alpha_2) = 9,5 \times 10^{-7} / ^\circ\text{C}$. Outro importante ponto a ser notado na Eq. 1.16 é que a birrefringência devido à tensão não é função do comprimento de onda λ , por-

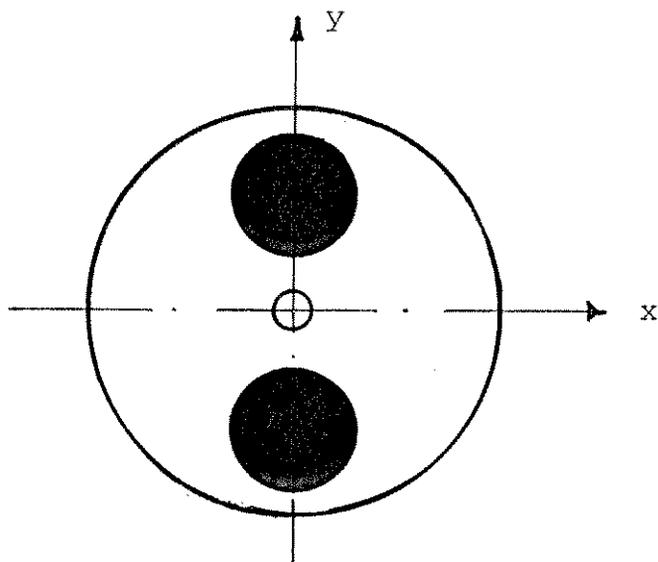


FIG. 1.3 - Secção transversal de uma fibra óptica de alta birrefringência devido a tensões mecânicas assimétricas.

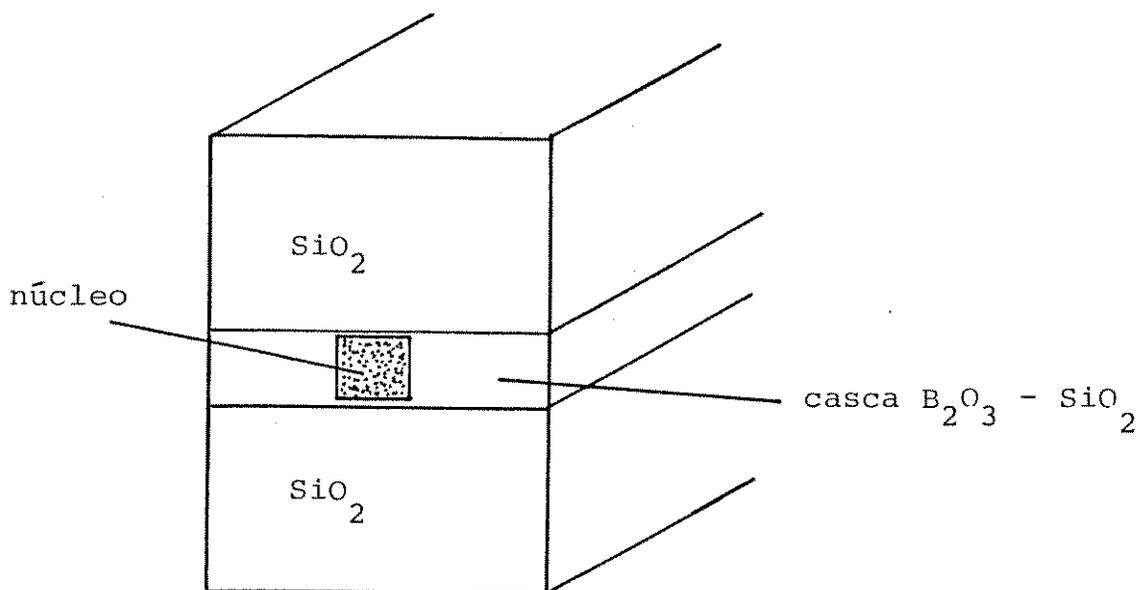


FIG. 1.4 - Guia retangular.

tanto B_g é constante e independentemente do valor da frequência normalizada V .

1.4. BIRREFRINGÊNCIA DEVIDO À FORMA

Seja uma fibra com o núcleo como mostrado na Fig. 1.5, onde o eixo maior da elipse é igual a $2a_x$ e o eixo menor $2a_y$ sendo n_1 e n_2 respectivamente, os índices de refração do núcleo e da casca.

Esta assimetria na forma do núcleo da fibra introduz uma birrefringência pois os modos HE_x e HE_y irão propagar-se com diferentes constantes de propagação de fase β_x e β_y , dependentes do grau de elipsidade, como mostrado abaixo.

Para diferentes geometrias do núcleo a Birrefringência Modal devido à forma B_g já foi calculada na literatura ^{|4|, |9|, |12| |13|, |14|}. Geralmente esta birrefringência não pode ser representada por uma expressão simples pois depende fortemente da frequência normalizada V dada na Eq. 1.5.

Uma expressão para a fibra de núcleo elíptico ^{|9|} é dada por

$$B_g = e n_1 \Delta^2 G(V) \quad (1.18)$$

onde

$e = (1 - a_y/a_x)$ = elipsidade do núcleo

a_x = semi-eixo maior da elipse do núcleo

a_y = semi-eixo menor da elipse do núcleo

$G(V)$ = função que depende da frequência normalizada e dada por

$$G(V) = \frac{w^2}{V^4} \left[u^2 + (u^2 - w^2) \left(\frac{J_0(u)}{J_1(u)} \right)^2 + uw^2 \left(\frac{J_0(u)}{J_1(u)} \right)^3 \right] \quad (1.19)$$

onde

$u = a(n_1^2 k^2 - \beta_i^2)^{1/2}$ = constante de propagação transversal do núcleo

$w = a(\beta_i^2 - n_2^2 k^2)^{1/2}$ = constante de decaimento exponencial na casca

$V = (u^2 + w^2)^{1/2}$ = frequência normalizada

$a = (a_x + a_y)^{1/2}$ = raio médio do núcleo

β_i = constante de propagação de fase em um meio não perturbado

$k = \frac{2\pi}{\lambda}$ = número de onda

J_0, J_1 = funções de Bessel de ordem 0 e 1.

Utilizando-se da expressão aproximada $w \approx 1,1428 V - 0,9960$ dada na Ref. [4] e $u = (V^2 - w^2)^{1/2}$ que relacionam as constantes de propagação transversal do modo HE_{11} (LP_{01}) em função da frequência normalizada na região de $1 < V < 3$, foi possível calcular a dependência de $G(V)$ com V cujo resultado é apresentado na Fig. 1.6.

Para uma fibra com os seguintes parâmetros: $V = 2,4$; $a = 3,0 \mu\text{m}$; $\lambda = 0,72 \mu\text{m}$; $\Delta = 0,2\%$ e $n_1 = 1,461$, calculou-se a Birrefringência Modal devido à geometria B_g para uma elipsidade do núcleo $e = 0,1$ encontrando-se $B_g = 2,3 \times 10^{-7}$. Para se obter uma fibra com $B_g = 1,4 \times 10^{-4}$ em $\lambda = 0,85 \mu\text{m}$, o valor de Δ deve ser aumentado para 2% e a elipsidade do núcleo para 0,6; com isso para a fibra operar no regime monomodo, os eixos da elipse do núcleo devem ser $2a_x = 3,2 \mu\text{m}$ e $2a_y = 1,2 \mu\text{m}$, tornando difícil a emenda e conexão dessas fibras em um sistema de transmissão.

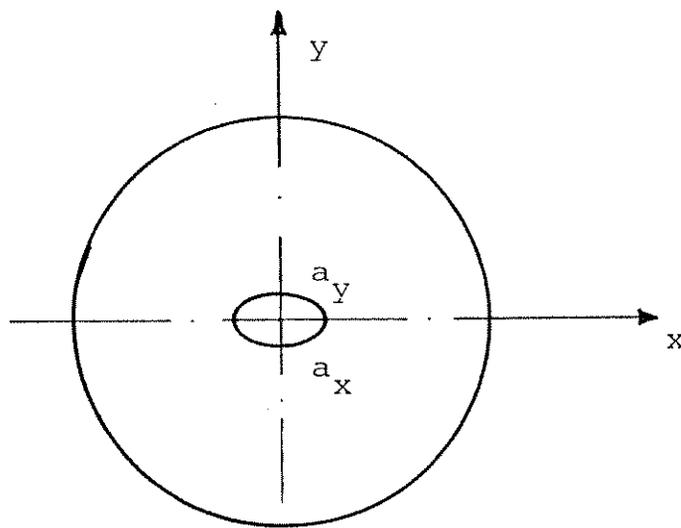


FIG. 1.5 - Secção transversal de uma fibra Óptica de núcleo elíptico.

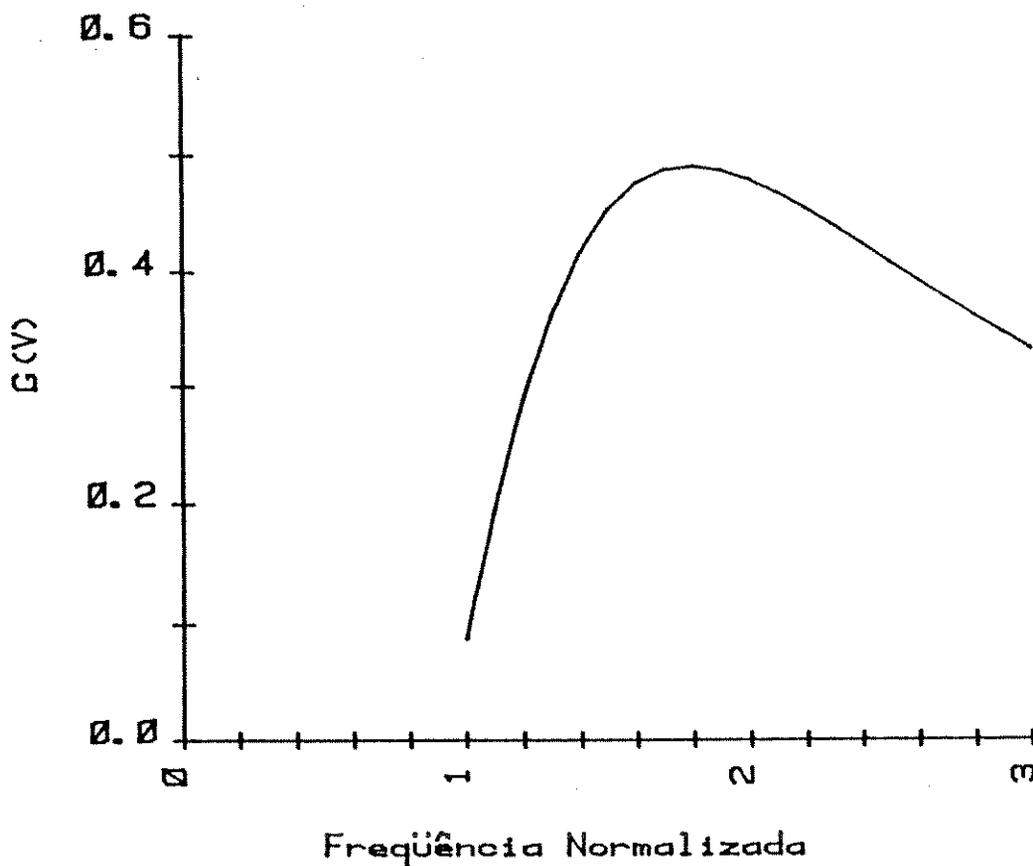


FIG. 1.6 - Dependência de $G(V)$ com a frequência normalizada para o modo HE_{11} .

1.5. BIRREFRINGÊNCIA DEVIDO A EFEITOS EXTERNOS

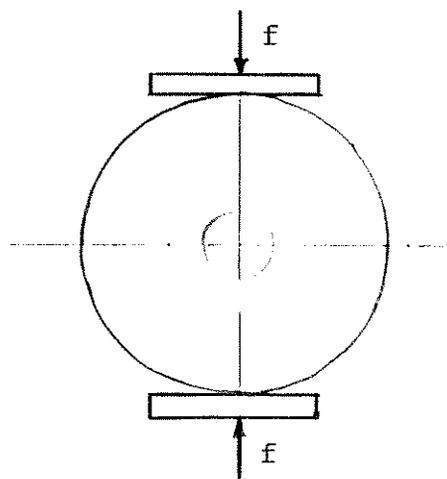
A birrefringência em uma fibra óptica pode ser introduzida por alguma ação externa que modifica o estado de polarização da luz propagando ao longo da fibra. Esses mecanismos são muito úteis em sensores a fibras ópticas mas trazem problemas em aplicações onde é requerido um estado de polarização estável.

A importância de se conhecer os parâmetros da birrefringência externa devido a cada mecanismo é de fundamental importância no projeto e construção de sensores a fibra óptica [2], [4]. No presente trabalho havia a necessidade de somente conhecer quais eram esses mecanismos e como evitá-los durante a caracterização das fibras birrefringentes.

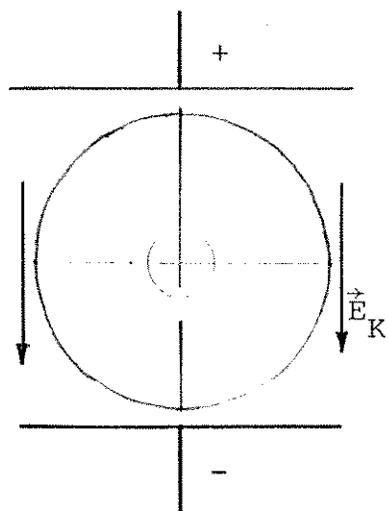
Alguns desses mecanismos estão mostrados na Fig. 1.7. Pressão, curvatura e torção introduzem birrefringência devido ao efeito fotoelástico e deverão ser estes os principais mecanismos a serem evitados durante a caracterização das fibras.

A aplicação de um campo elétrico transversal \vec{E}_K induzirá birrefringência linear através do efeito Kerr [11], enquanto que um campo magnético aplicado longitudinalmente ao longo do eixo da fibra induzirá birrefringência circular através do efeito Faraday [11].

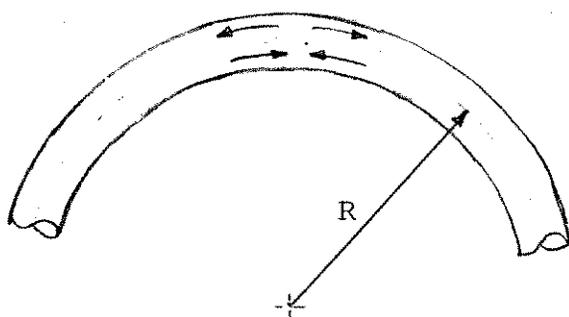
Neste capítulo procurou-se, portanto, apenas mostrar as origens da birrefringência em fibras ópticas monomodo de forma que os mecanismos que introduzem birrefringência sejam evitados no processo de fabricação das fibras de baixa birrefringência e durante as medidas para a caracterização das mesmas.



a) pressão

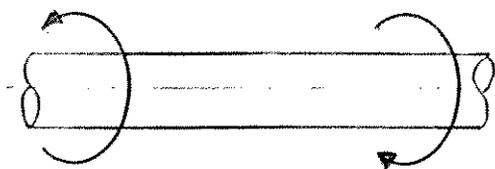


b) campo elétrico

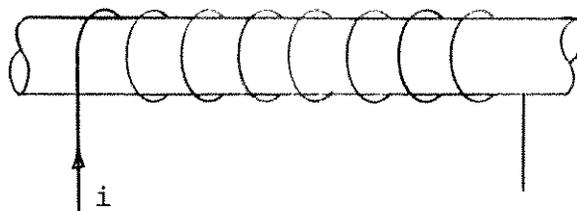


c) curvatura

Birrefringência Linear



d) torção



e) campo magnético

Birrefringência Circular

FIG. 1.7 - Mecanismos que podem introduzir birrefringência em uma fibra óptica monomodo.

CAPÍTULO 2 - FIBRAS ÓPTICAS DE ALTA BIRREFRINGÊNCIA (FOAB)

2.1. INTRODUÇÃO

Neste capítulo são mostrados e discutidos os tipos existentes de fibras ópticas de alta birrefringência (FOAB), suas propriedades, bem como apresentadas as técnicas de medidas das propriedades ópticas relevantes a este trabalho.

As caracterizações da birrefringência foram efetuadas na região de comprimento de onda acima de $0,6\mu\text{m}$ por várias razões. A principal delas é que os componentes ópticos disponíveis no laboratório, como placas retardadoras de $\lambda/4$ e $\lambda/2$ usadas na análise do estado de polarização da luz, foram fabricadas para operarem no comprimento de onda do laser de He-Ne ($\lambda = 6328 \text{ \AA}$); outro forte motivo foi o fato de que as fibras de alta birrefringência utilizadas possuíam comprimento de onda de corte em torno de $0,6\mu\text{m}$, mas felizmente, para todos os efeitos práticos, a região entre $0,6$ e $1,6\mu\text{m}$ é a de maior interesse, tendo em vista que as fibras serão utilizadas nesta janela. Por ter se trabalhado na região do visível, naturalmente existe uma maior facilidade em se observar os efeitos.

As medidas realizadas nas FOAB foram importantes para se obter uma maior sensibilidade nas medidas pois nelas os efeitos de mudança do estado de polarização são mais pronunciados. Além disso, elas são relativamente imunes a perturbações externas e podem portanto transmitir um estado de polarização linear estável.

As medidas do grau de polarização em uma fibra de casca elíptica são também apresentadas mostrando a validade do modelo birrefringente usado para essas fibras.

2.2. TIPOS EXISTENTES DE FOAB

Não existe uma classificação definitiva separando fibras de alta e baixa birrefringência. Essa classificação é determinada pelos valores de Birrefringência Modal B , obtidos nas fibras ópticas monomodo atualmente utilizadas em telecomunicações, sendo que estes valores situam-se entre 10^{-6} e 10^{-5} |11|. Pode-se considerar que FOAB possuem $B > 10^{-5}$ enquanto que para as de baixa birrefringência, o valor de B é menor que 10^{-6} .

A birrefringência interna em uma fibra óptica monomodo é o resultado de uma combinação linear de dois mecanismos $B = B_g + B_s$, onde B_g é a contribuição devido à geometria e B_s devido a tensões mecânicas |12|. Dessa forma, através da utilização individual ou de ambos os mecanismos, é possível construir-se fibras com alta birrefringência. Vários métodos foram utilizados obtendo-se as mais variadas estruturas, sendo que o maior valor obtido de Birrefringência Modal foi $8,5 \times 10^{-4}$ para uma fibra PANDA |11|.

Na Fig. 2.1 são mostradas algumas estruturas de FOAB já obtidas e a seguir descreve-se como são fabricadas.

- NÚCLEO ELÍPTICO: a preforma depois de fabricada pelo processo MCVD |16|, é desbastada como mostra a Fig. 2.1 (a). Com a alta temperatura necessária para o puxamento da fibra, aproximadamente 2000°C , há um abaixamento drástico da viscosidade da sílica e adicionada aos efeitos da tensão superficial, a casca da fibra torna-se circular, criando uma deformação no núcleo |11|. O alto valor de Δ necessário para um aumento da Birrefringência Modal e conseqüentemente o pequeno diâmetro para a fibra operar em regime monomodo, aliado às altas atenuações obtidas da ordem de 25 dB/km em $0,85\mu\text{m}$ |12|, faz

com que a introdução da birrefringência através de tensões mecânicas internas torne-se o principal objetivo, como veremos nas fibras abaixo.

- CASCA ELÍPTICA: esta fibra é assim denominada não pela forma da casca externa da fibra e sim pelo formato da casca depositada que está em volta do núcleo, como visto na Fig. 2.1 (b). A preforma fabricada pelo processo MCVD, tendo a casca depositada dopada com 12 mol % de $B_2O_3-SiO_2$, possui um coeficiente de expansão térmica diferente do tubo substrato (SiO_2)^[17]. Para se conseguir a elipsidade da casca depositada a preforma é desbastada como na de núcleo elíptico, ou então é colapsada com pressão reduzida dentro do tubo substrato^[11].

Devido à assimetria na forma da casca obtida durante o processo de fabricação, a distribuição das tensões também é assimétrica, causando birrefringência devido ao efeito fotoelástico.

A atenuação neste tipo de fibra é da ordem de 6,0 dB/km em 0,85µm e a Birrefringência Modal é da ordem de $2,8 \times 10^{-4}$ ^[12].

- "SIDE-TUNNEL": outro tipo de fibra onde a birrefringência é introduzida por efeito geométrico^[11], é a fibra "side-tunnel" que foi puxada de uma preforma com dois furos localizados ao lado do núcleo. Para manter a estrutura núcleo e furos durante o processo de puxamento é introduzido um gás com leve pressão nos furos e feito um controle preciso da temperatura de puxamento^[18]. O máximo valor obtido de $B = 7,3 \times 10^{-5}$ está muito abaixo de outras estruturas de fibra já realizadas.

- DEFORMAÇÃO DE PREFORMA: a preforma feita pelo método MCVD, com núcleo de sílica e camadas da casca altamente dopadas de $B_2O_3-SiO_2$ que será o elemento aplicador de tensão, é aquecida localmente e amassada entre duas placas planas, produzindo uma preforma aplainada na qual a região altamente dopada torna-se elíptica^[19]. Durante o processo de puxamento da fibra, o controle da tensão de puxa-

mento é necessário para manter a forma da estrutura, além disso a monitoração das dimensões em um dos eixos é também importante para assegurar uniformidade em todo o comprimento. Esta fibra apresenta baixa atenuação da ordem de 0,47 dB/km em $1,5\mu\text{m}$ e $B = 1,6 \times 10^{-4}$, tendo a vantagem, devido à sua forma externa retangular (Fig. 2.1 (d)), de facilitar a localização do seu eixo principal.

- PANDA: fabricada pelo processo VAD (Vapor-Phase Axial Deposition) |20| onde a preforma, depois de pronta, é furada mecanicamente com máquina de ultrassom (Fig. 2.1 (e)). Nesses furos são inseridos dois bastões de uma preforma dopada com $\text{B}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$ (15 mol %) feita pelo processo MCVD, que vão se tornar os elementos aplicadores de tensão ("SAP"). Essa estrutura é uma das quais são obtidos os melhores resultados tanto da Birrefringência Modal quanto do valor de atenuação, da ordem de 0,25 dB/km em $1,57\mu\text{m}$, que ficam próximos dos conseguidos com fibras convencionais |21| .

- "BOW-TIE": este tipo de fibra é fabricada pelo processo normal de MCVD. Primeiro, camadas levemente dopadas de $\text{F/P}_2\text{O}_5/\text{SiO}_2$ são depositadas para casamento com o índice de refração do tubo substrato de SiO_2 . Elas são então seguidas por camadas altamente dopadas (20 mol %) de $\text{B}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$, quando então o movimento giratório do torno é parado e dois maçaricos são posicionados de modo a obterem-se duas zonas quentes diametralmente opostas nas paredes do tubo substrato. Essas zonas quentes são então movimentadas ao longo do comprimento do tubo enquanto o gás SF_6 com nitrogênio é passado pelo interior do tubo, fazendo um ataque localizado na camada de $\text{B}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$. Quando esta fase é completada, o tubo é novamente girado e camadas de $\text{F/P}_2\text{O}_5/\text{SiO}_2$ são depositadas, seguidas pelas camadas do núcleo de $\text{GeO}_2\text{-SiO}_2$. O tubo é então colapsado com uma pequena pressão positiva interna

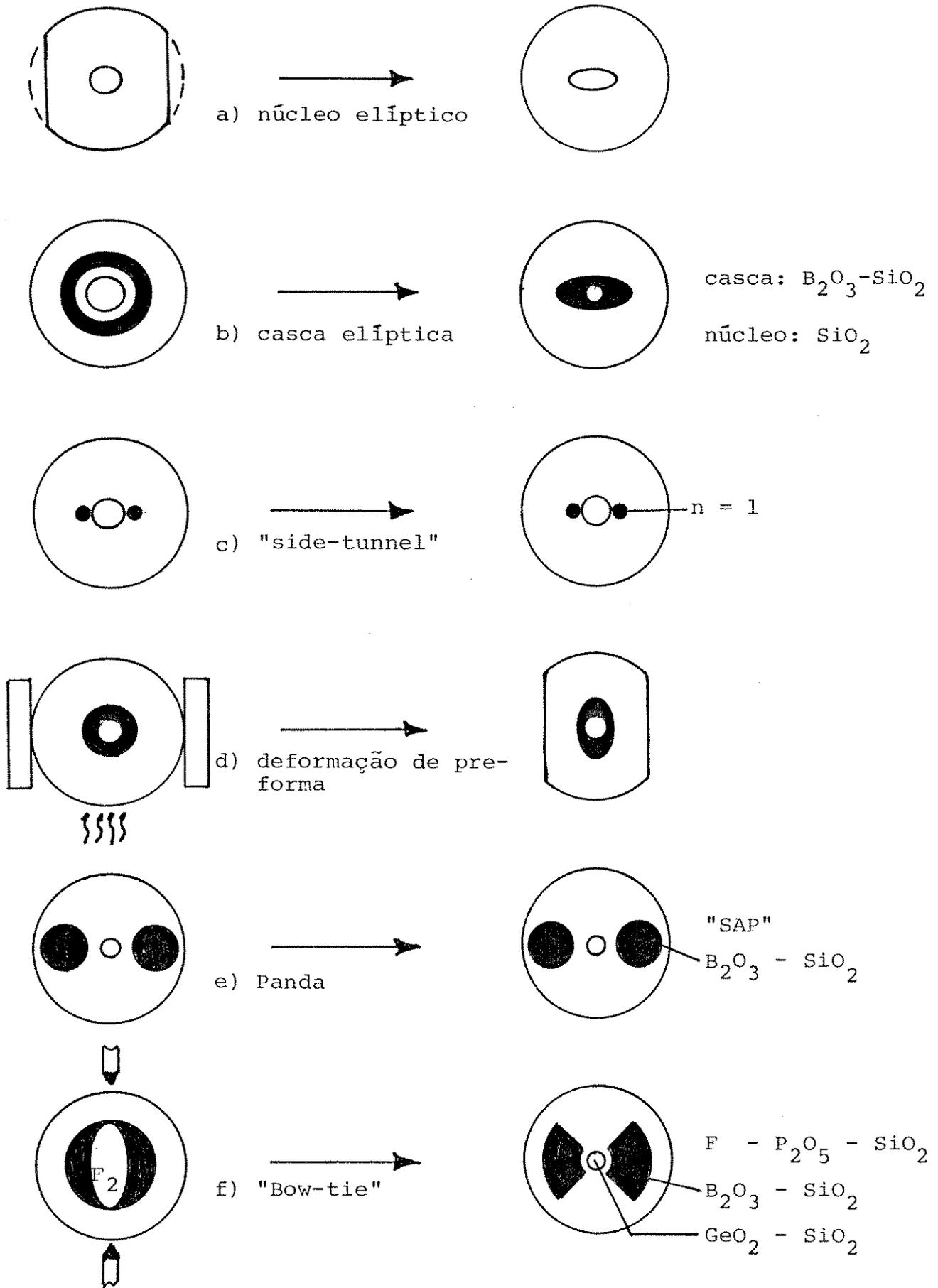


FIG. 2.1 - Alguns tipos de fibra de alta birrefringência.

para assegurar a circularidade do núcleo e tomar a forma da Fig. 2.1 (f). A vantagem desse método é que a preforma é feita inteiramente no torno, sem a necessidade de sua remoção para outras operações com risco de quebra da preforma. Os valores obtidos de $B = 4,9 \times 10^{-4}$ e atenuação de 3,6 dB/km em $0,85\mu\text{m}$ são também excelentes |22|.

2.3. CARACTERIZAÇÃO DAS FIBRAS UTILIZADAS

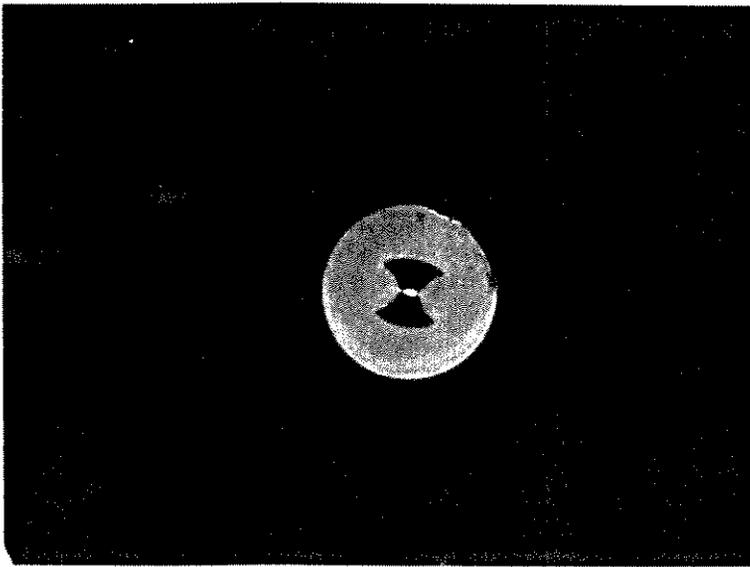
As FOAB utilizadas neste trabalho eram amostras, sendo que a de maior comprimento (5 metros) foi a fibra de casca elíptica. As outras eram a fibra "Bow-tie" e a PANDA (Fujikura Ltd).

Foi feita uma caracterização geométrica das fibras e para tanto utilizou-se um microscópio óptico invertido com uma objetiva de 40X. A fibra foi iluminada por transmissão e através de um retículo micrométrico, localizado na ocular de 10X, foram feitas as medições.

As características geométricas são dadas na Fig. 2.2, juntamente com as fotografias da secção transversal das fibras, obtidas no mesmo microscópio adaptado com uma câmera Polaroid.

As regiões escuras localizadas no interior das fibras correspondem aos elementos aplicadores de tensão feitos de $\text{B}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$. A fibra PANDA possui uma casca depositada com índice de refração maior que o tubo substrato, sendo visto na fotografia como a região em torno no núcleo em que há mais transmissão de luz. Essa luz propagando nessa região é difícil de ser removida porque está sendo guiada e será indesejável nas medições a serem efetuadas nesta fibra.

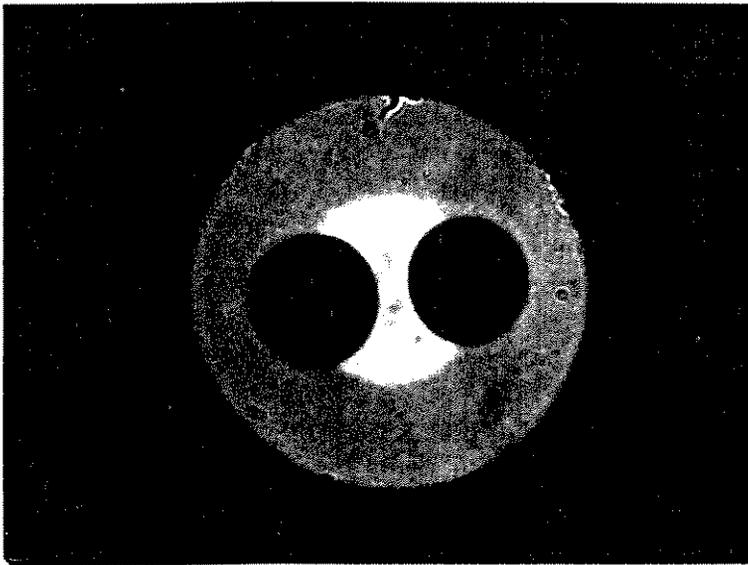
A fibra "Bow-Tie" apresenta-se na fotografia proporcionalmente menor que as outras devido à mudança na lente de focalização da câmera Polaroid.



"BOW-TIE"

Diâmetro da casca = $80\mu\text{m}$

Diâmetro do núcleo = $5\mu\text{m}$



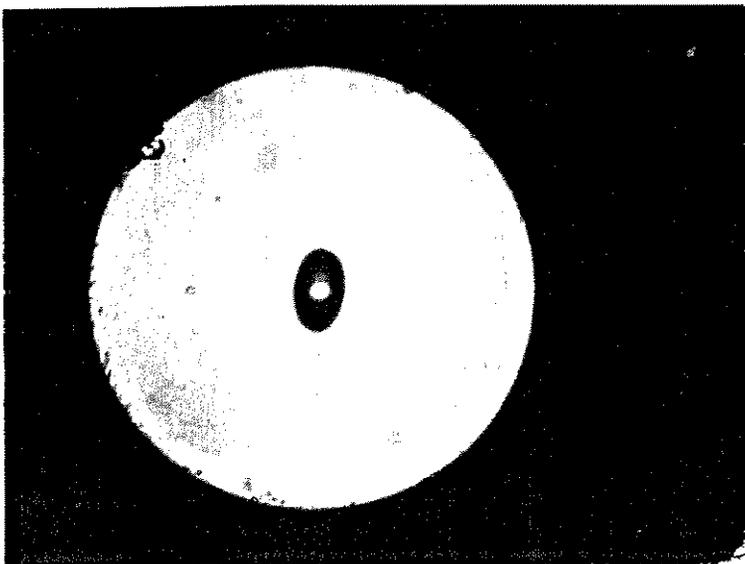
PANDA - FUJIKURA LTD.

Diâmetro da casca = $123\mu\text{m}$

Diâmetro do núcleo = $4\mu\text{m}$

Diâmetro "SAP" = $37\mu\text{m}$

Dist.centros "SAP" = $47\mu\text{m}$



CASCA ELÍPTICA

Diâmetro da casca = $139\mu\text{m}$

Diâmetro do núcleo = $5\mu\text{m}$

Elipse da casca depositada

Eixo maior = $26\mu\text{m}$

Eixo menor = $15\mu\text{m}$

FIG.2.2- Fotografia da secção transversal das fibras utilizadas.

Outra caracterização efetuada na fibra de casca elíptica foi a medida do comprimento de onda de corte.

O comprimento de onda de corte λ_c é definido para o comprimento de onda acima do qual a fibra se comporta monomodalmente, isto é, somente existe a propagação do modo fundamental $HE_{11}(LP_{01})$.

A atenuação do segundo modo LP_{11} é afetada por flutuações no diâmetro do núcleo da fibra, por curvaturas e microcurvaturas que alteram o valor do λ_c , o qual é dado teoricamente por:

$$\lambda_c = \frac{2 \pi a}{2,405} (n_1^2 - n_2^2)^{1/2} \quad (2.1)$$

Dessa forma, o valor do λ_c efetivo da fibra tem que ser medido sobre determinadas condições. O método utilizado baseia-se na atenuação do modo LP_{11} devido à curvatura.

A montagem experimental é a mesma utilizada na medida da atenuação espectral em fibras ópticas. A luz de uma lâmpada de 100W de halogêneo-tungstênio, depois de atravessar o monocromador e um "chopper" usado na modulação da luz, é lançada em uma fibra multimodo de 2 metros de comprimento.

A outra ponta da fibra multimodo é então soldada em um pedaço de 1 metro da fibra de casca elíptica de modo que esta se mantenha reta sobre a mesa óptica, e no seu final outra fibra multimodo é soldada para levar o sinal até o detector. Este procedimento é necessário para não introduzir curvaturas e pressões na fibra de casca elíptica e que acabariam modificando o valor do comprimento de onda de corte a ser medido.

A cada comprimento de onda λ , dado pelo monocromador, a intensidade transmitida $P_1(\lambda)$ é detectada em um detector de Si-PIN ligado a um amplificador "lock-in" e o valor obtido é armazenado

em um microcomputador HP-9825; então o comprimento de onda é incrementado e nova aquisição de dados é feita até que toda a varredura no intervalo de comprimento de onda a ser medido esteja completa.

Uma curvatura com um raio de 14cm é introduzida na fibra de casca elíptica e com o monocromador na posição inicial nova varredura é feita e a intensidade transmitida $P_2(\lambda)$ é novamente armazenada. O valor da atenuação, $A(\lambda) = 10 \log (P_1(\lambda)/P_2(\lambda))$ é calculado para cada comprimento de onda e o resultado é mostrado na Fig. 2.3, obtendo-se um valor para λ_c de $0,585\mu\text{m}$.

2.4. MEDIDA DO GRAU DE POLARIZAÇÃO

O conhecimento da evolução do estado de polarização da luz ao longo da fibra é importante, tanto para caracterizar a birrefringência como na utilização de fibras ópticas em dispositivos sensíveis à polarização.

Para tanto a fibra óptica monomodo é modelada como um meio birrefringente em que os dois eixos principais são ortogonais entre si ^{|23|}; com isso é possível prever a característica da polarização de saída na fibra em função da polarização de entrada e do comprimento da fibra.

Na Fig. 2.4. são mostrados os parâmetros utilizados neste modelo, sendo que os eixos principais da fibra estão coincidentes com os eixos x e y em um sistema de coordenadas cartesianas. No caso da fibra de núcleo elíptico, os eixos principais são os eixos maior e menor da elipse do núcleo. Para o caso das fibras birrefringentes devido a tensões, estes eixos são os de simetria dos elementos aplicadores de tensões.

A incidência de um feixe de luz monocromática linearmente polarizada de amplitude E_0 , com um ângulo θ em relação ao eixo x,

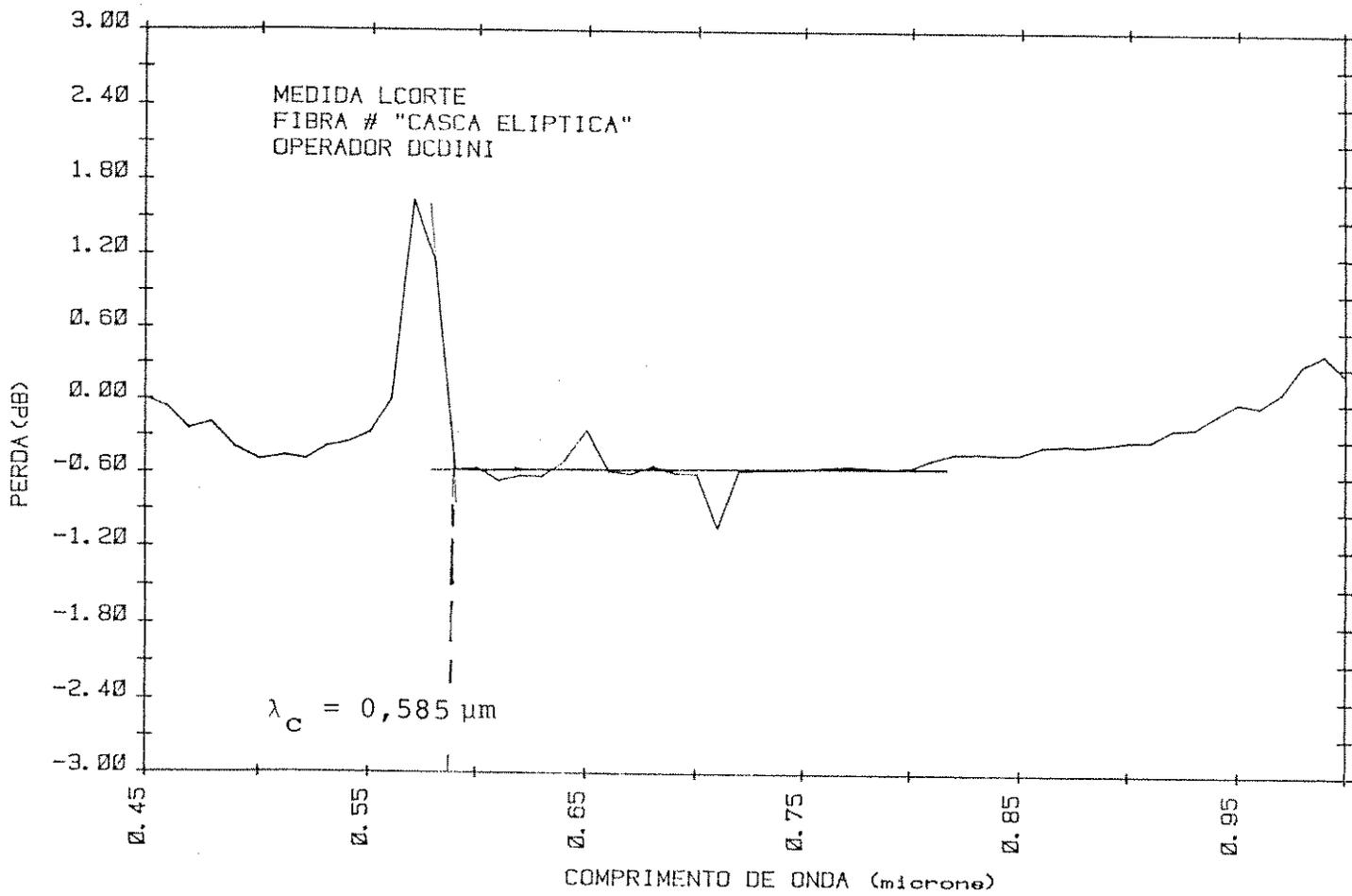


FIG. 2.3 - Resultado da medida do comprimento de onda de corte em uma fibra de casca elíptica.

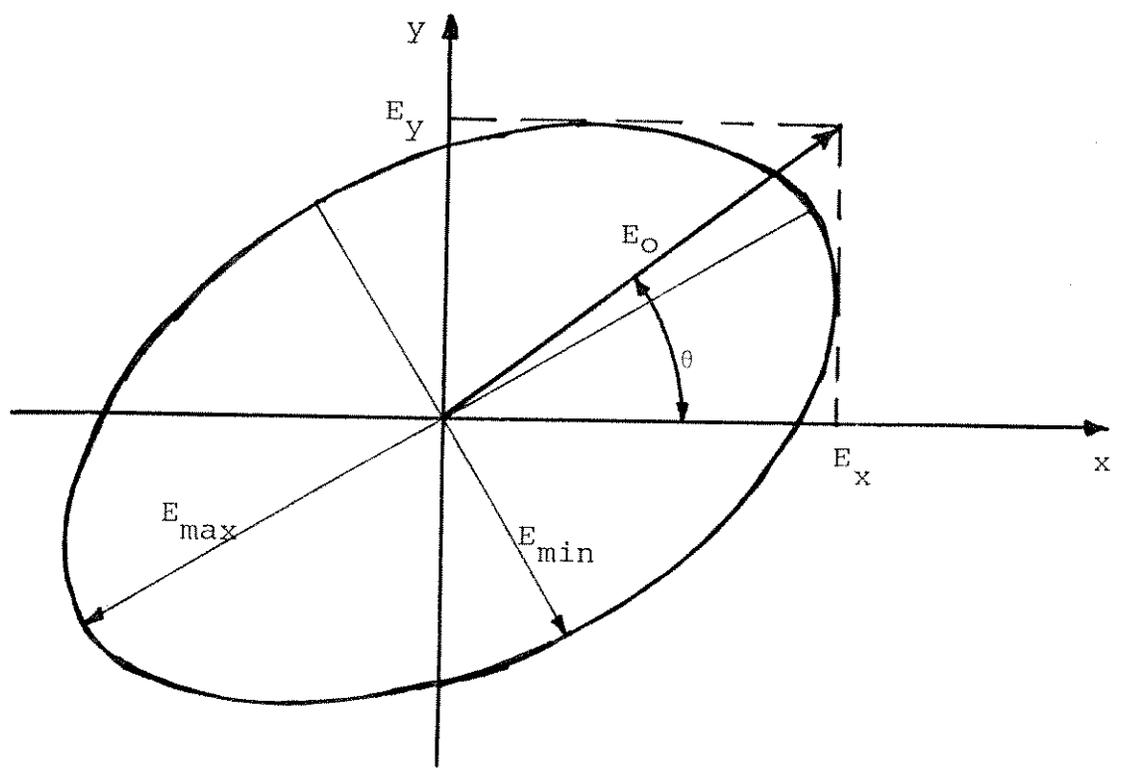


FIG. 2.4 - Elipse de polarização na saída de uma fibra óptica birrefringente, com os eixos principais nas direções x e y, quando do lançamento de uma luz linearmente polarizada com um ângulo θ em relação ao eixo x.

pode ser considerada como o resultado de duas componentes linearmente polarizadas ao longo dos eixos principais.

Na saída da fibra essas componentes serão:

$$E_x = E_o \cos \theta \cos(\omega t - \beta_x z) \quad (2.2)$$

$$E_y = E_o \sin \theta \cos(\omega t - \beta_y z) \quad (2.3)$$

A diferença de fase δ entre os dois modos ortogonais na saída da fibra de comprimento L é dada por:

$$\delta = \Delta\beta L \quad (2.4)$$

onde

$$\Delta\beta = (\beta_x - \beta_y)$$

Devido a esta diferença de fase, a luz na saída da fibra estará elipticamente polarizada e a razão entre o campo elétrico mínimo e máximo da elipse de polarização na saída da fibra é dada por [24], [25]

$$\eta = \frac{E_{\min}}{E_{\max}} = \frac{\sin 2\theta \sin \delta}{1 + (1 - \sin^2 2\theta \sin^2 \delta)^{1/2}} \quad (2.5)$$

O grau de polarização P é definido como

$$P = \frac{E_{\max}^2 - E_{\min}^2}{E_{\max}^2 + E_{\min}^2} = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max} + I_{\min}} \quad (2.6)$$

onde I_{\max} e I_{\min} correspondem, respectivamente, às intensidades dos eixos maior e menor da elipse de polarização na saída da fibra.

Utilizando-se da Eq. (2.5) o grau de polarização pode

ser expresso como:

$$P = \frac{1 - \eta^2}{1 + \eta^2} = (1 - \sin^2 2\theta \sin^2 \delta)^{1/2} \quad (2.7)$$

O grau de polarização obtido a partir das medidas de I_{\max} e I_{\min} tem a vantagem de não ser afetado por flutuações temporais da luz ao longo das medições, já que as intensidades máxima e mínima para um determinado ângulo de incidência é feita em um curto espaço de tempo.

Analisando a Eq. (2.7) vemos que se o ângulo θ da luz linearmente polarizada em relação ao eixo x (ou eixo principal) for igual a 0° , 90° , 180° , ..., coincidindo portanto com os eixos principais da fibra, o grau de polarização será unitário, significando que a luz permanecerá linearmente polarizada.

Para verificar a validade deste modelo foi feita a medida do grau de polarização no final da fibra para cada ângulo de incidência θ , de uma luz linearmente polarizada lançada na fibra. Para isto foi utilizada a montagem experimental da Fig. 2.5 cujos detalhes são mostrados nas fotografias da Fig. 2.7.

O feixe de um laser de He-Ne ($\lambda = 6328 \text{ \AA}$) linearmente polarizado com potência de 3 mW é modulado por um "chopper" que fornece a referência para ao amplificador "lock-in". Este feixe linearmente polarizado ao incidir com um ângulo de 45° em relação ao eixo principal da placa de $\lambda/4$, sofre uma transformação da luz linearmente polarizada para luz circularmente polarizada. Dessa forma é possível lançar na fibra, depois do feixe ter atravessado um polarizador dicrótico e com a utilização de uma objetiva de microscópio de 10X, uma luz linearmente polarizada de intensidade fixa, em qualquer ângulo definido por um dos eixos principais da fibra

e o eixo de polarização do polarizador.

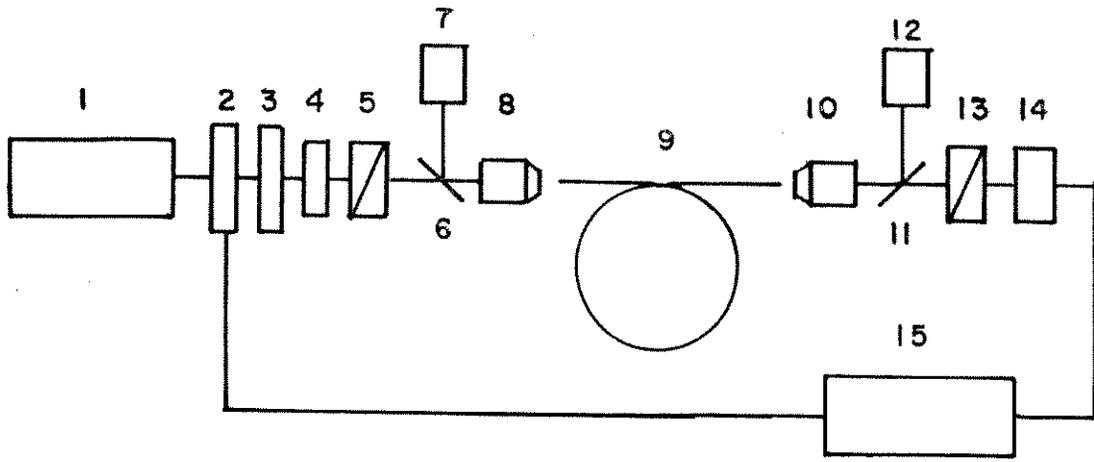
Na saída da fibra a luz é colimada por uma objetiva de 10X e, depois de atravessar o analisador rotativo, é detectada por um detector de Si-PIN ligado ao amplificador "lock-in".

A medida começa com a localização aproximada de um dos eixos principais da fibra. Isto é feito com a ajuda do sistema de visualização/iluminação indicado pelos números 7 e 12 na montagem esquemática da Fig. 2.5. Com ela é possível visualizar a direção do eixo de simetria da estrutura da fibra, no caso dado pelo eixo maior (ou menor) da elipse da casca depositada que aparecerá escura no visor. Depois, com a medida de I_{\min} na saída da fibra para cada pequena mudança angular no polarizador, é possível encontrar o ângulo de incidência zero. Este ângulo será aquele em que se obtiver a menor intensidade mínima na saída da fibra; nesta condição o polarizador e o analisador estarão cruzados e o lançamento estará sendo feito em um dos eixos principais da fibra.

As medidas são realizadas encontrando-se primeiramente a intensidade mínima (I_{\min}) e em seguida girando em 90° o analisador para encontrar a intensidade máxima (I_{\max}). Portanto as I_{\min} e I_{\max} estão, respectivamente, ao longo dos eixos menor e maior da elipse de polarização na saída da fibra. Com os valores de I_{\max} e I_{\min} o grau de polarização é calculado.

A partir de então, o polarizador foi sendo girado de 10° em 10° e o grau de polarização medido. Estas medidas foram feitas até 180° , sendo também medidos os valores para $\theta = 45^\circ$ e 135° . A fibra que tinha comprimento inicial de 3 metros, foi depois cortada a partir da extremidade final, sem mexer na extremidade inicial. Novas medições para o comprimento de 1,1 metro foram efetuadas.

Os resultados obtidos para os dois comprimentos da fibra



- | | |
|---|--------------------------|
| 1. laser He-Ne ($\lambda = 633\text{nm}$ polarizado) | 8,10. objetiva 10X |
| 2. chopper | 9. fibra |
| 3. atenuador variável | 13. analisador |
| 4. placa de $\lambda/4$ | 14. detector Si-PIN |
| 5. polarizador | 15. amplificador lock-in |
| 6,11. divisor de feixe | |
| 7,12. visor/iluminador | |

FIG. 2.5 - Montagem experimental.

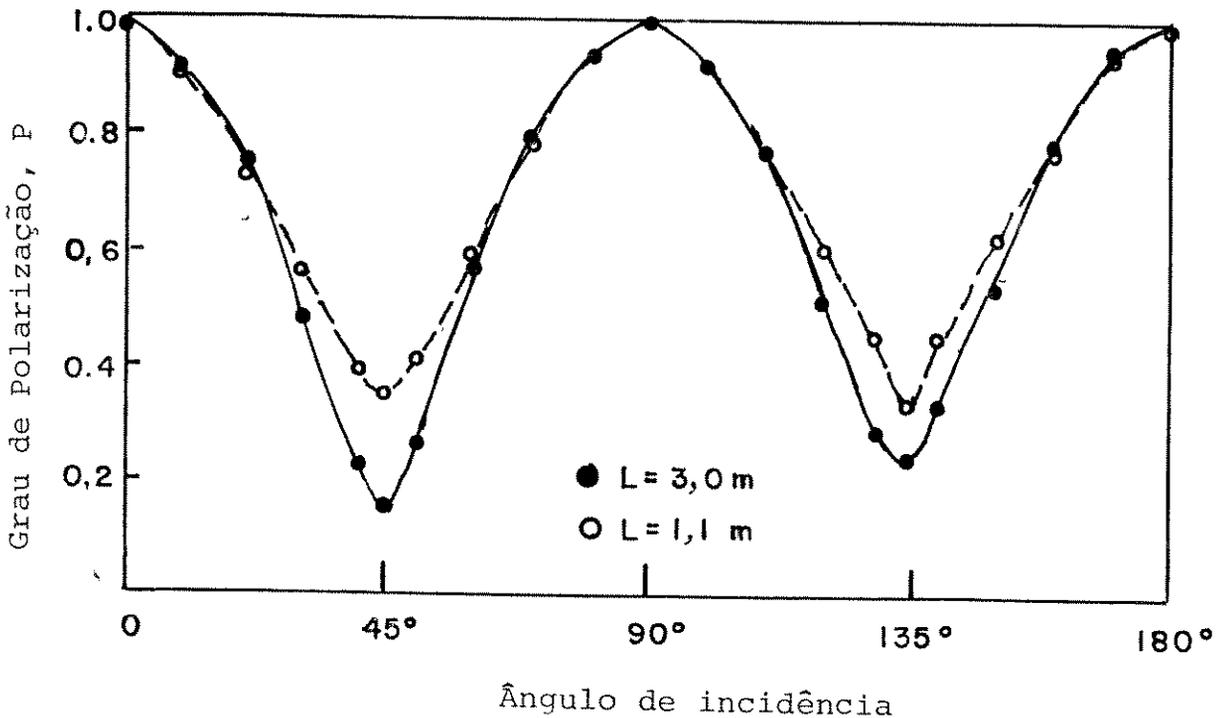
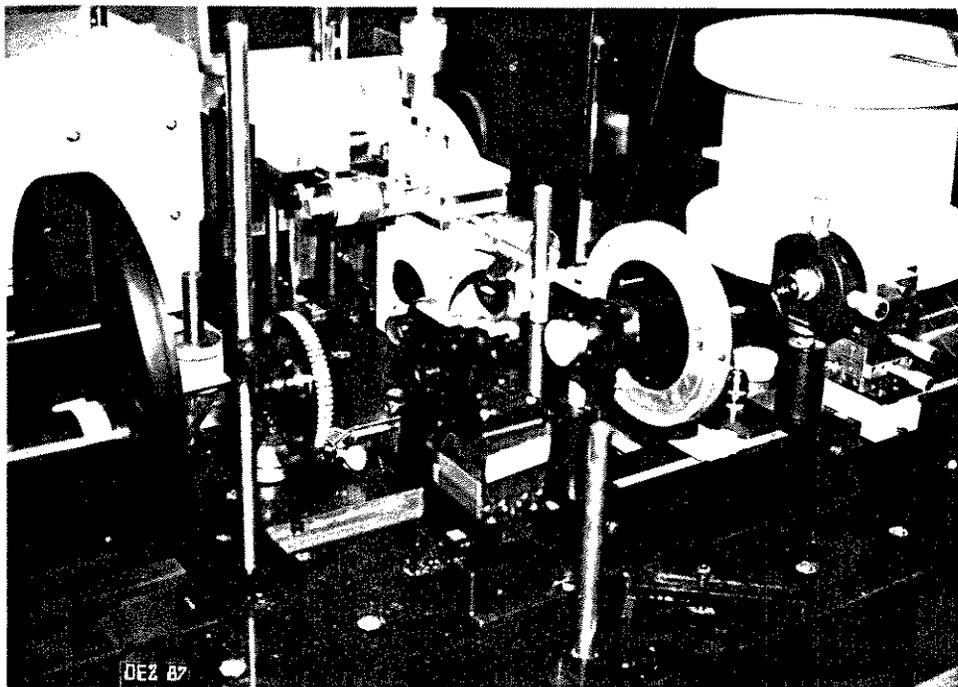


FIG. 2.6 - Relação entre o grau de polarização e o ângulo de incidência da luz linearmente polarizada.

de casca elíptica são mostrados na Fig. 2.6. Nela vemos que o grau de polarização é maior quando a incidência é feita nos ângulos de 0° , 90° e 180° , significando que a luz linearmente polarizada está sendo feita nos eixos principais da fibra. Para os outros ângulos o grau de polarização varia como dado pela Eq. 2.7. Para os ângulos de incidência $\theta = 45^\circ$ e $\theta = 135^\circ$, são casos especiais que serão apresentados no Capítulo 3 onde o grau de polarização dependerá unicamente da diferença de fase no final da fibra, podendo o grau de polarização ter valores de 0 a 1.

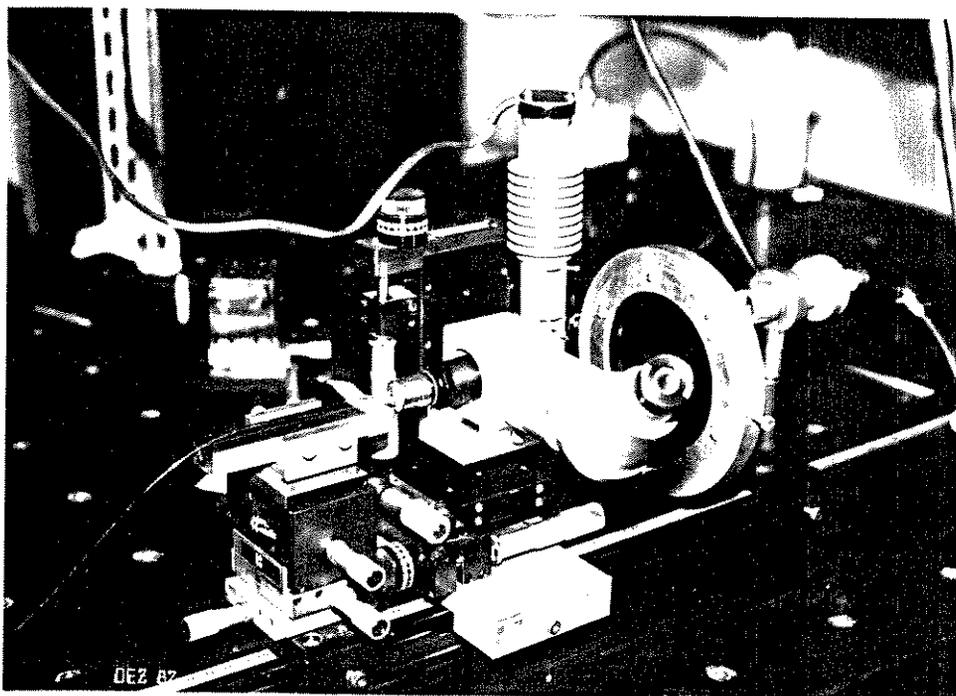
Portanto a medida do grau de polarização em função da variação do ângulo de incidência da luz linearmente polarizada mostra a existência na fibra de dois eixos ortogonais entre si, de tal forma que quando o lançamento da luz linearmente polarizada é feito em um desses eixos principais, a polarização é mantida independentemente do comprimento da fibra de alta birrefringência.

Das outras FOAB aqui apresentadas, PANDA e "Bow-tie", espera-se os mesmos resultados. Estes foram confirmados com suas utilizações no Capítulo 3, onde nas medidas de caracterização feitas, necessita-se primeiramente da localização dos eixos principais dessas fibras.



a) Sistema de Lançamento

Laser de He-Ne - Chopper - Atenuador Variável -
Placa de $\lambda/4$ - Polarizador Dicroico - Objetiva-
XYZ.



b) Sistema de Detecção

XYZ - objetiva - visor/iluminador - analisador -
detector.

FIG. 2.7 - Fotografia da montagem experimental.

a) Sistema de Lançamento

b) Sistema de Detecção

CAPÍTULO 3 - MÉTODOS PARA MEDIDA DO COMPRIMENTO DE BATIMENTO EM FIBRAS ÓPTICAS MONOMODO DE ALTA BIRREFRINGÊNCIA

3.1. INTRODUÇÃO

A birrefringência em uma fibra monomodo causa uma diferença nas velocidades de propagação entre os dois estados ortogonalmente polarizados do modo fundamental HE_{11} . Essa diferença das velocidades faz com que a fibra exiba um atraso de fase entre os dois modos, linearmente crescente com o comprimento, conforme dado pela Eq. (2.4), o qual provoca uma variação periódica do estado de polarização ao longo da fibra.

Este efeito devido à birrefringência é mostrado na Fig. 3.1, onde uma luz linearmente polarizada é lançada com um ângulo $\theta = 45^\circ$ em relação ao eixo x, excitando igualmente os dois modos; ao se propagar, o modo HE_x terá um atraso de fase relativo a HE_y . Após um certo comprimento esta diferença de fase chega a 2π radianos, fazendo com que a condição inicial seja reproduzida.

Esse comprimento, L_b , é chamado comprimento de batimento e é dado por

$$L_b = \frac{2\pi}{|\Delta\beta|} \quad (3.1)$$

A Birrefringência Modal B, definida na Eq. (1.6), é então relacionada com L_b , para um determinado comprimento de onda λ , por

$$B = \frac{\lambda}{L_b} \quad (3.2)$$

Apresenta-se neste capítulo três métodos para a caracterização do comprimento de batimento em fibras ópticas monomodo.

O primeiro é o método do Espalhamento Rayleigh e que per-

mite visualizar a evolução do estado de polarização ao longo da fibra. O segundo método utilizado é o da varredura em frequência (ou do comprimento de onda). Por último apresenta-se o método do corte, utilizado na caracterização das fibras de baixa birrefringência fabricadas durante este trabalho e cujos resultados serão apresentados no Capítulo 6. Apresenta-se aqui o procedimento para a realização da medida bem como alguns resultados teóricos que mostram a eficácia deste método.

Deve-se tomar uma precaução em todos os métodos acima, com relação à eliminação da luz guiada pela casca da fibra.

Quando do lançamento da luz no núcleo e pelo fato de que a abertura numérica e o "spot size" do sistema óptico são geralmente maiores que o da fibra, parte da luz é lançada na casca e irá afetar os resultados obtidos.

A luz guiada na casca é dependente do material utilizado como revestimento primário de proteção da fibra. Este material pode ser de silicone com índice de refração $n = 1,43$ ou acrilato ($n = 1,54$). No caso de revestimento de silicone com índice de refração menor que a casca da fibra ($n = 1,457$), esta luz passa a ser guiada na estrutura casca/revestimento.

Para sua eliminação utilizam-se dois procedimentos; o primeiro envolve a colocação da fibra em um líquido com índice de refração maior que o da casca. Este líquido, por exemplo xilol, difunde através do revestimento primário de silicone e ao atingir a casca remove esta luz indesejável. Isto ocorre pois o xilol em contato com a casca da fibra modifica a estrutura de guiamento (casca/revestimento), de modo que a luz anteriormente guiada na casca passe para o xilol que possui índice de refração maior que o da casca da fibra.

O segundo prevê a remoção do revestimento primário e a colocação de líquidos com índice de refração maior que o da casca. No caso do revestimento primário ser de acrilato, a luz lançada na casca da fibra não encontra condição de guiamento nesta estrutura (casca/revestimento de acrilato) sendo totalmente removida depois de propagar por um comprimento de fibra maior que 30cm.

3.2. MÉTODO DO ESPALHAMENTO RAYLEIGH

O espalhamento Rayleigh é um dos mecanismos intrínsecos de perda do sinal óptico em uma fibra. Este espalhamento deve-se às flutuações microscópicas na densidade do vidro no momento da solidificação, causando variações do índice de refração.

A perda devido ao espalhamento Rayleigh é proporcional a λ^{-4} sendo, para a fibra monomodo de sílica dopada com germânio, da ordem de 0,9 dB/km em $\lambda = 1,0\mu\text{m}$ ^[4] tendo $\Delta n = 3 \times 10^{-3}$ devido somente à dopagem de GeO_2 .

A luz espalhada pelo efeito Rayleigh é perpendicular à direção de propagação do campo elétrico e da luz ^[26] como mostrado na Fig. 3.2. Portanto a observação da luz espalhada lateralmente ao longo da fibra, quando do lançamento de uma luz linearmente polarizada com um ângulo $\theta = 45^\circ$, em relação a um dos eixos principais da fibra, como mostrado na Fig. 3.1, permitirá visualizar regiões de máximo e mínimo espalhamento devido à mudança do estado de polarização ao longo da fibra ^[17,23]. A região de máximo ou mínimo espalhamento corresponde a uma observação normal ou paralela, respectivamente, do campo elétrico em relação ao observador.

Para a medida do comprimento de batimento na fibra de casca elíptica, empregou-se um laser de kriptônio ($\lambda = 6471 \text{ \AA}$) contínuo, com uma potência de 250 mW.

luz linearmente polarizada

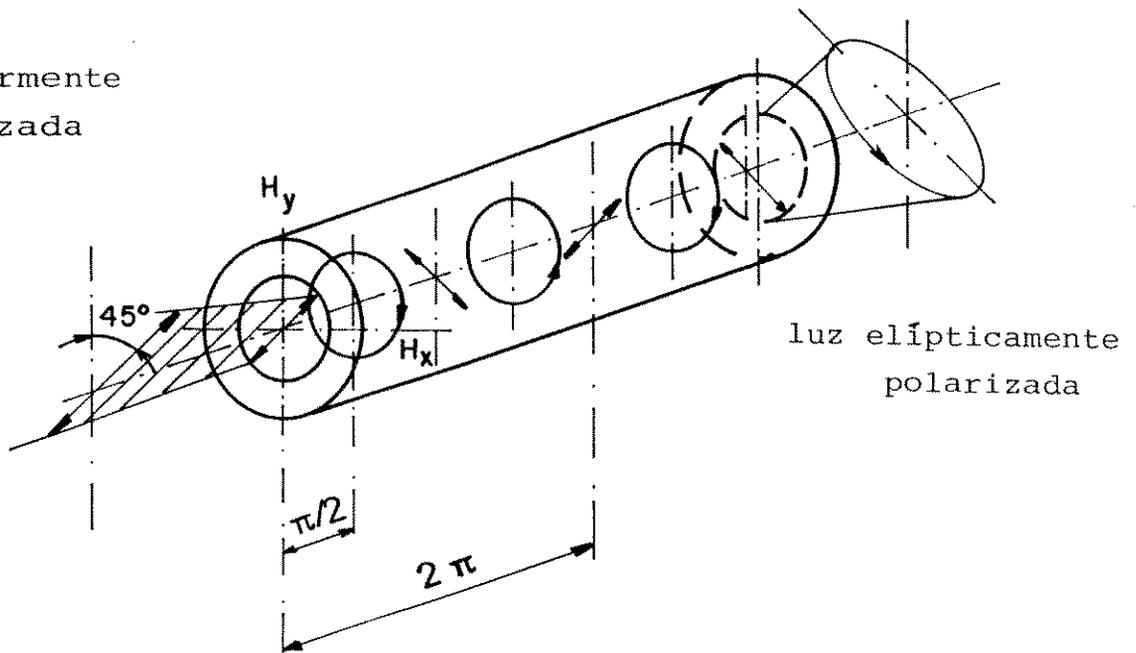


FIG. 3.1 - Mudança do estado de polarização ao longo de uma fibra óptica birrefringente. |23|

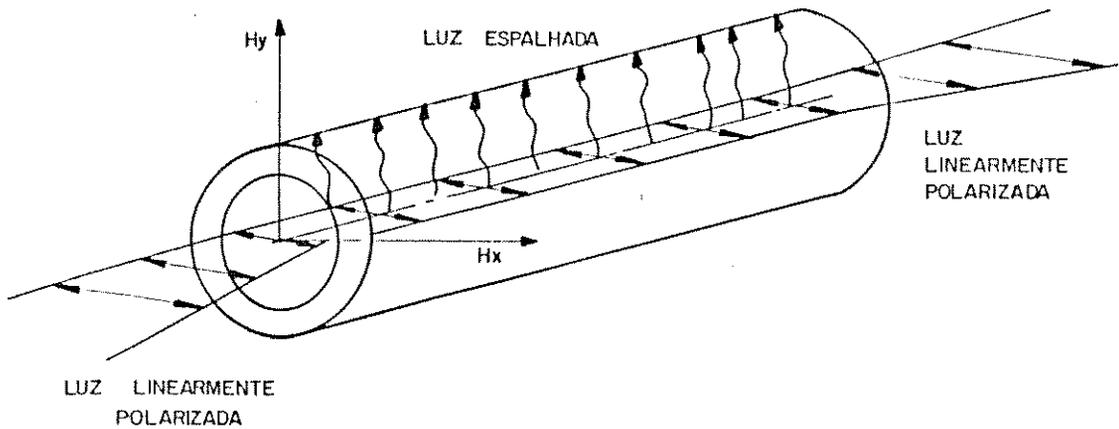


FIG. 3.2 - Direção da luz espalhada, quando da propagação de uma luz linearmente polarizada ao longo da fibra.

A luz desse laser estava linearmente polarizada e foi lançada na fibra através de uma objetiva de 10X.

Fixou-se a fibra em um sistema de rotação, como mostra a Fig. 3.3, que a fazia girar sobre seu eixo em 360° . Esse sistema estava montado em um sistema de translação XYZ para facilitar a focalização do feixe de luz. Observou-se a luz no final da fibra usando como analisador um polarizador dicróico. No lançamento, a fibra foi sendo girada e o grau de polarização observado na saída da fibra, até que este atingisse um máximo, significando que a luz estava sendo lançada em um dos eixos principais da fibra. Nessa condição, girou-se a ponta inicial da fibra de 45° e o efeito da evolução do estado de polarização na fibra pode ser observado.

Nos primeiros metros de fibra havia muita luz sendo guiada pela casca, fazendo com que o efeito fosse mascarado. Houve a necessidade de retirar o revestimento primário em um pedaço ao longo da fibra e a colocação de glicerina para remoção desta luz guiada. Fotografou-se uma região no final da fibra com comprimento igual a 38mm utilizando-se de uma câmera Polaroid, cujo resultado é mostrado na parte inferior da Fig. 3.4.

O comprimento de batimento é a distância entre dois nulos consecutivos. A fibra de casca elíptica teve, em $\lambda = 647,1 \text{ nm}$, um comprimento de batimento $L_b = 5,3 \text{ mm}$, correspondendo a uma Birrefringência Modal $B = 1,22 \times 10^{-4}$, sendo portanto uma fibra de alta birrefringência.

A fotografia mostrada na parte superior da Fig. 3.4 foi feita utilizando-se um laser de argônio ($\lambda = 4880 \text{ \AA}$).

A medida do comprimento de batimento pelo método do espalhamento Rayleigh é um método rápido e prático quando operado dentro de seus limites. Essa limitação impõe-se pela necessidade da

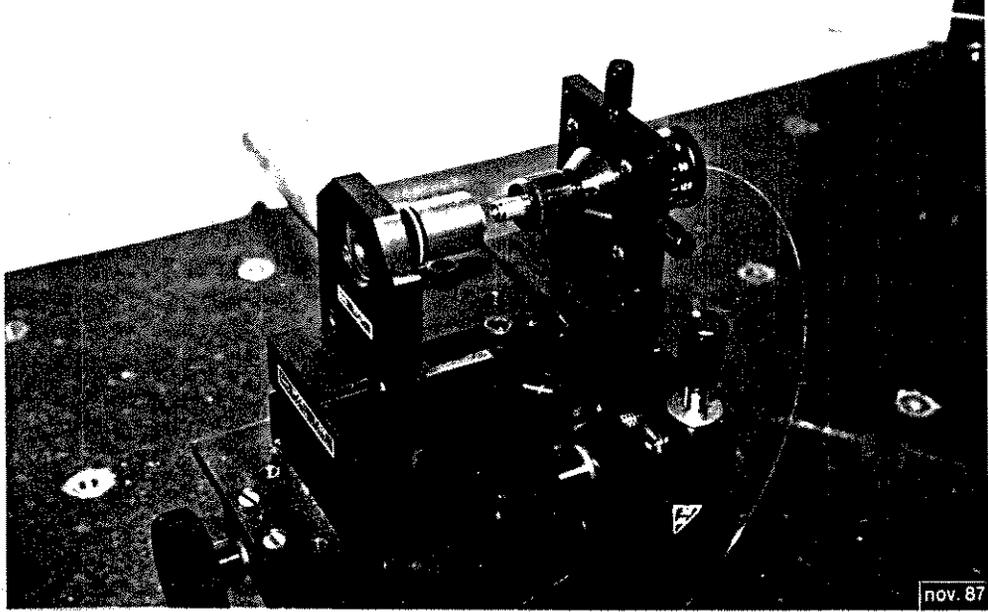
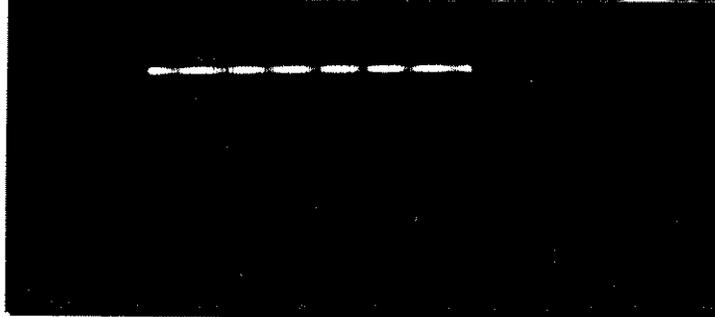
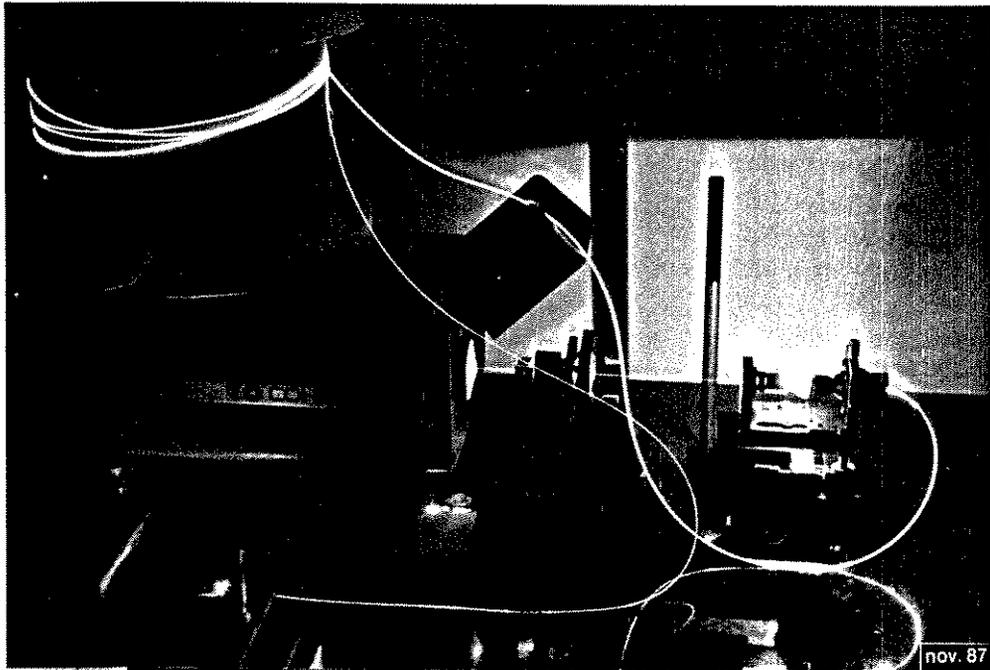


FIG. 3.3 - Detalhe do sistema de lançamento da luz do laser na fibra de casca elíptica.



$d=38\text{mm}$

40seg

FIG. 3.4 - Fotografia superior: Sistema utilizado para medida do comprimento de batimento na fibra de casca elíptica. Fotografia inferior: regiões de máximo e mínimo espalhamento verificado em uma região de 38mm da fibra de casca elíptica.

utilização de um laser de alta potência ($P > 50 \text{ mW}$) para a sua visualização, quando a medida for efetuada na região do visível. A utilização de detectores impõe-se quando o laser utilizado for de baixa potência ou se estiver trabalhando na região do infravermelho entre $0,7\mu\text{m}$ e $1,0\mu\text{m}$. Acima de $1,0\mu\text{m}$ fica difícil a observação deste efeito devido à dependência com λ^{-4} do espalhamento Rayleigh.

A faixa de sua utilização também fica limitada para comprimento de batimento entre 1mm e 10cm , devido à dificuldade da localização da região de mínimo espalhamento.

3.3. MÉTODO DA VARREDURA EM FREQUÊNCIA

Neste método determina-se o comprimento de batimento pela dependência da diferença de fase com o comprimento de onda (ou frequência). Aqui, um pedaço de fibra monomodo de alta birrefringência de comprimento conhecido, é colocado entre o polarizador e o analisador, de tal forma que um dos eixos principais da fibra fique com um ângulo θ em relação ao eixo de polarização do polarizador e do analisador. Para um determinado comprimento de onda, a amplitude do sinal transmitido dependerá da posição relativa entre o polarizador e o analisador e da diferença de fase [27].

Como existem duas posições relativas entre o polarizador e o analisador para a realização desta medida, elas serão aqui analisadas. No primeiro caso, o polarizador (P) e o analisador (A) estão cruzados (Fig. 3.5(a)). Nesta condição, o feixe de luz depois de atravessar o polarizador cujo eixo de polarização está ao longo da direção P, torna-se linearmente polarizado nesta direção com amplitude E_0 . Os eixos principais da fibra birrefringente estão coincidentes com os eixos x e y. Dessa forma a incidência do feixe de luz com um ângulo θ em relação ao eixo x, excitará os dois modos ortogonais que se propagarão com diferentes velocidades.

As amplitudes E_x , E_y dessas componentes são dadas por

$$E_x = E_o \cos \theta \quad (3.3)$$

$$E_y = E_o \sin \theta \quad (3.4)$$

No final da fibra estas componentes terão uma diferença de fase ϕ dada por

$$\phi = \Delta\beta L \quad (3.5)$$

O analisador A deixará passar somente as componentes que representem a projeção de E_x e E_y sobre a direção de A. Estas componentes E_A e E_A' , depois de atravessar o analisador, terão amplitudes

$$E_A = E_x \sin \theta = E_o \sin \theta \cos \theta \quad (3.6)$$

$$E_A' = E_y \cos \theta = E_o \sin \theta \cos \theta \quad (3.7)$$

Essas equações mostram que, independente do ângulo θ , as componentes E_A e E_A' transmitidas pelo analisador, têm magnitudes iguais quando o polarizador e o analisador estão cruzados.

Como esses campos elétricos procedem de uma mesma componente E_o e estão na mesma linha, podem se interferir ^[27]. As componentes E_A e E_A' estão dirigidas em sentidos contrários; portanto, além da diferença de fase dada na Eq. (3.5), existe uma diferença de fase complementar de π radianos. Dessa forma a soma de suas diferenças de fase ϕ_1 será

$$\phi_1 = \phi + \pi \quad (3.8)$$

Quando a diferença de fase na fibra for $\phi = (2m + 1)\pi$ radianos, sendo m um número inteiro, a diferença de fase total ϕ_1 será $2m\pi$ radianos, as componentes se reforçam e a amplitude transmitida será máxima. Por outro lado, para $\phi_1 = (2m + 1)\pi$ radianos, as componentes se cancelam.

No segundo caso, o polarizador P está paralelo em relação ao analisador A , como mostrado na Fig. 3.5(b). Nesta condição as amplitudes das componentes E_A e E_A' serão dadas por:

$$E_A = E_x \cos \theta = E_o \cos^2 \theta \quad (3.9)$$

$$E_A' = E_y \sin \theta = E_o \sin^2 \theta \quad (3.10)$$

Agora as amplitudes E_A e E_A' somente serão iguais para $\theta = \pi/4$ radianos, mas estas componentes estão dirigidas para o mesmo sentido e, portanto, a diferença de fase ϕ_2 será apenas dada pela diferença de fase ϕ na fibra.

Então para um ângulo $\theta = \pi/4$ radianos, correspondendo a $E_A = E_A'$ e para uma diferença de fase na fibra de π radianos, estas componentes se cancelam e a intensidade transmitida depois do analisador é mínima. Para o caso da diferença de fase ser igual a $2m\pi$ radianos, a intensidade será máxima.

Portanto, a única influência em se colocar o polarizador e o analisador cruzados ou paralelos, quando estes tiverem um ângulo $\theta = \pi/4$ radianos em relação ao eixo x da fibra birrefringente e a diferença de fase na fibra ϕ for igual a $2m\pi$ radianos, será que a intensidade transmitida depois do analisador será máxima quando o polarizador e o analisador estiverem paralelos e será mínima quando eles estiverem cruzados.

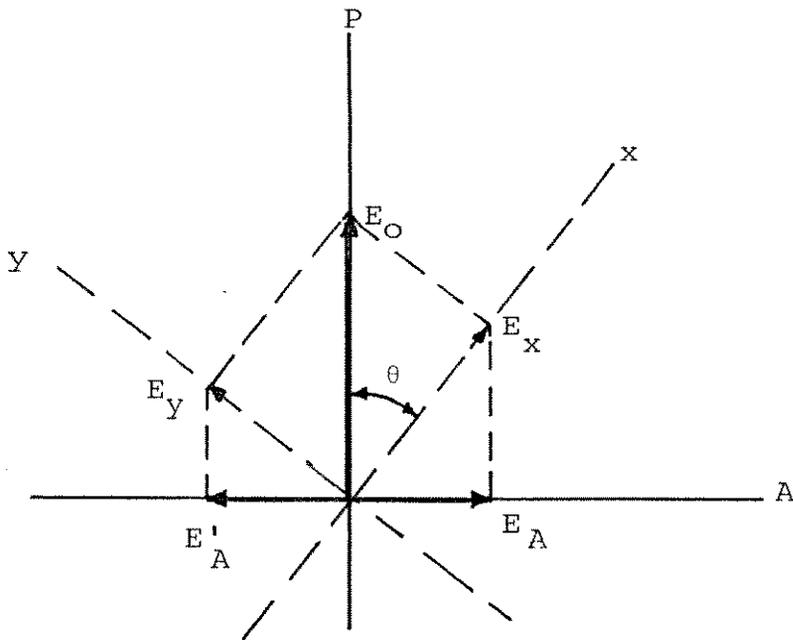


FIG. 3.5a - Amplitude das componentes depois de atravessar uma fibra birrefringente com eixos principais nas direções x e y , quando o polarizador e o analisador estão cruzados.

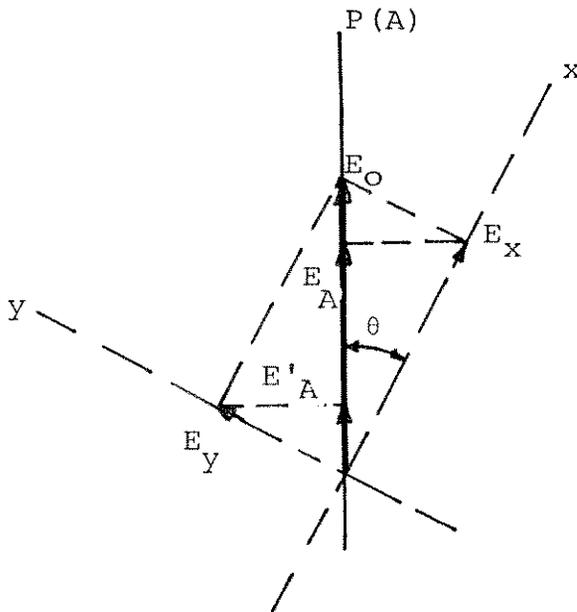


FIG. 3.5b - Amplitude das componentes depois de atravessar uma fibra birrefringente com eixos principais nas direções x e y , quando o polarizador e o analisador estão paralelos.

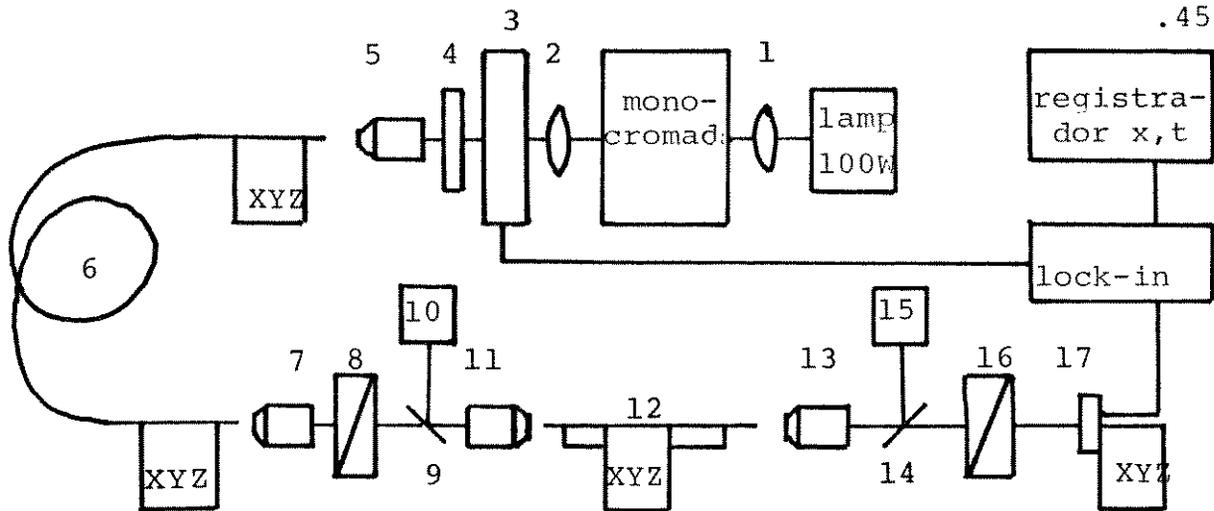
Na medida experimental utilizou-se a montagem esquemática da Fig. 3.6, sendo que nas Figs. 3.7, 3.8 e 3.9 são mostradas fotografias dos detalhes dessa montagem, na qual a luz de uma lâmpada de halogêneo-tungstênio de 100W, depois de atravessar o monocromador Jarrell-Ash de 0,5 metros, foi lançada em uma fibra multimodo através de uma objetiva de 10X.

Isto torna-se necessário pelo fato da luz ficar parcialmente polarizada devido aos componentes ópticos utilizados; por outro lado, ao final da fibra multimodo já se obteve luz totalmente despolarizada pela alta taxa de conversão de modos nesta fibra. A largura espectral na saída do monocromador, dada pela sua dispersão e pela abertura da fenda, é de 3,2nm.

Assim, após esse feixe luminoso despolarizado passar através de um polarizador Glan-Taylor, obtém-se uma luz linearmente polarizada de mesma intensidade para qualquer ângulo azimutal dado pelo eixo do polarizador. Essa luz polarizada linearmente com ângulo variável é lançada através de uma objetiva de 10X no pedaço de fibra de alta birrefringência colocado em cima de um suporte montado num sistema de translação XYZ.

No final da fibra sob teste, uma objetiva de 10X colimava a luz transmitida pela fibra e depois de atravessar o analisador, era lançada em um detector de Si do tipo PIN. Como a luz estava modulada por um "chopper" que fornecia o sinal de referência, o sinal detectado era enviado a um amplificador "lock-in", aqui utilizado devido ao baixo sinal a ser detectado quando da polarização cruzada. O sinal de saída deste amplificador foi ligado a uma registradora x,t para a aquisição de dados.

Depois do alinhamento óptico, o polarizador vai sendo rodado lentamente em pequenos ângulos e para cada posição angular do



- | | | | |
|------------|-----------------|--------|--|
| 1,2. | lente | 9,14. | divisor de feixe |
| 3. | chopper | 10,15. | visor/iluminador |
| 4. | filtro | 12. | fibra monomodo de alta birrefringência |
| 5,7,11,13. | objetiva 10X | 16. | analisador |
| 6. | fibra multimodo | 17. | detector Si-PIN |
| 8. | polarizador | | |

FIG.3.6- Montagem experimental

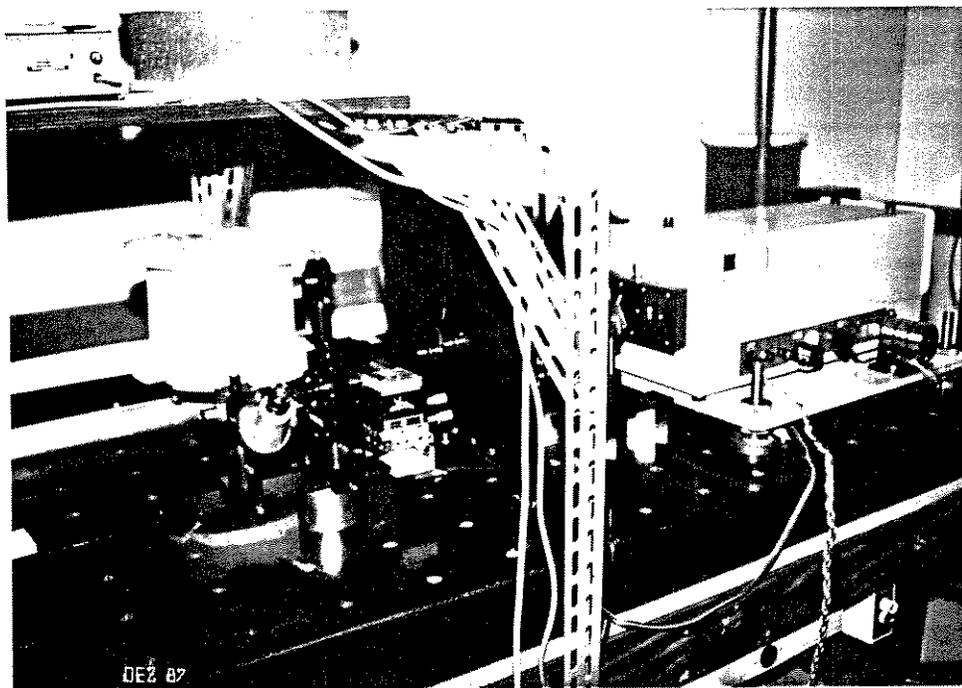


FIG. 3.7 - Detalhe da montagem experimental. Ao fundo o monocromador e na parte central o sistema de lançamento.

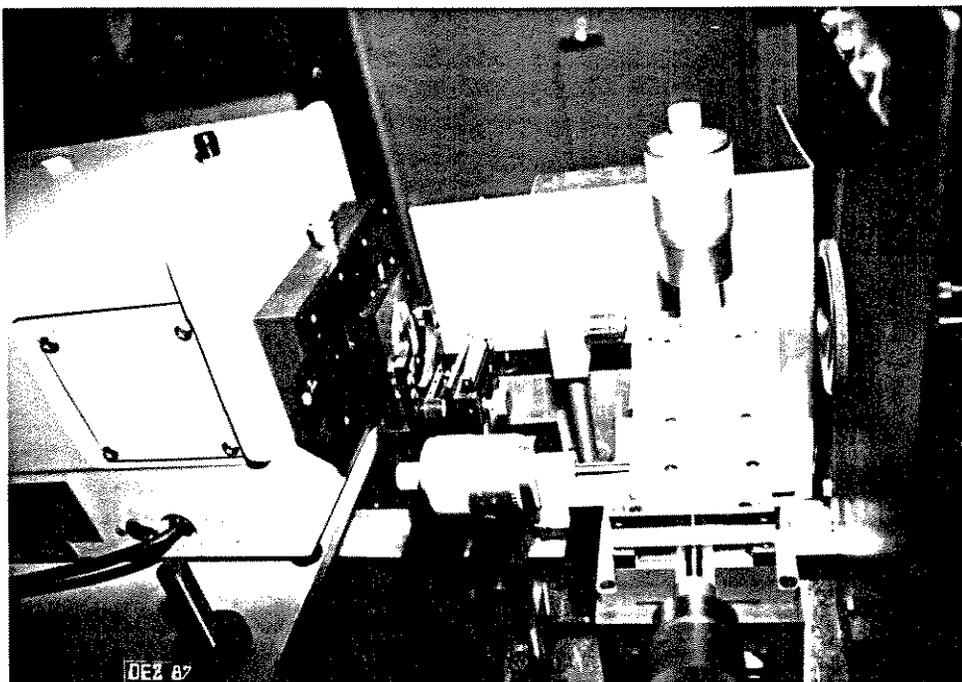


FIG. 3.8 - Detalhe do sistema de lançamento na fibra óptica multimodo.

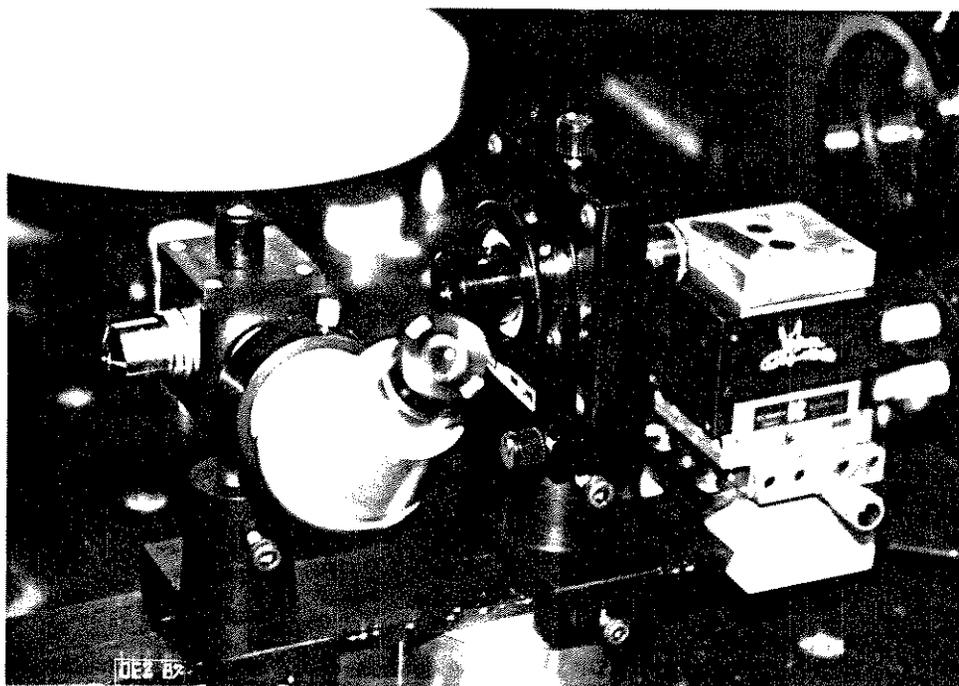


FIG. 3.9 - Detalhe do sistema de lançamento na fibra óptica monomodo de alta birrefringência, composto do XYZ, objetiva, polarizador, divisor de feixe/visor e objetiva.

polarizador, o analisador é também rodado até encontrar-se a intensidade mínima para um determinado comprimento de onda. Quando isso acontece, o polarizador e o analisador estão cruzados e, concomitantemente, garante-se que o lançamento está sendo feito em um dos eixos principais da fibra.

O polarizador e o analisador são girados de 45° cada um para excitar igualmente os modos ortogonais HE_x e HE_y . Quando o comprimento de onda (ou frequência) é mudado, a intensidade $I(\lambda)$ do sinal detectado varia ^[30], sendo que as variações medidas são mostradas nas Figs. 3.10, 3.12, 3.13 e 3.14.

O valor de $I(\lambda)$ é dado teoricamente ^[27,30] por:

$$I(\lambda) = I_0(\lambda) \cos^2 \frac{\phi}{2} \quad (3.11)$$

onde:

$I(\lambda)$ = intensidade detectada depois do analisador

$I_0(\lambda)$ = intensidade detectada antes do analisador

ϕ = diferença de fase

A cada ciclo completo, que é a distância entre dois máximos consecutivos, corresponde uma diferença de fase de $\phi = 2\pi$ radianos.

As fibras ópticas monomodo de alta birrefringência utilizadas nesta medida, têm o núcleo aproximadamente circular e altas tensões internas. Dessa forma, o valor da birrefringência devido a tensões mecânicas B_s é muito maior do que o introduzido pela birrefringência devido à forma B_g ; portanto a birrefringência total será, essencialmente, devido a B_s .

Utilizando-se a expressão para a Birrefringência Modal, $B = \lambda \Delta\beta / 2\pi$, a diferença de fase ϕ entre os dois modos ortogonais, dada na Eq. (3.5), pode ser reescrita como

$$\phi = \frac{2\pi}{\lambda} BL \quad (3.12)$$

Assumindo B independente do comprimento de onda, isto é, desprezando a contribuição devido a B_g e qualquer dependência da birrefringência com o comprimento de onda [28,29], pode-se calcular a mudança de fase $\Delta\phi$, introduzida por uma variação no comprimento de onda $\Delta\lambda$, onde $|\Delta\lambda| \ll \lambda$.

O valor de $\Delta\phi$ será dado por

$$\Delta\phi = -\frac{2\pi}{\lambda^2} \Delta\lambda LB \quad (3.13)$$

Utilizando-se o comprimento de batimento $L_b = \lambda/B$, e para uma diferença de fase igual a 2π , a Eq. (3.13) torna-se

$$L_b = L \frac{\Delta\lambda}{\lambda} \quad (3.14)$$

onde $\Delta\lambda$ e λ são, respectivamente, a diferença e a média entre os comprimentos de onda de dois máximos consecutivos [28,30], como mostrado na Fig. 3.10. Os resultados obtidos são a seguir apresentados.

A fibra "Bow-Tie" de comprimento $L = 109\text{mm}$ foi medida na região entre 700nm a 1000nm e seu resultado é mostrado na Fig. 3.10. A variação na intensidade máxima deve-se à resposta do sistema óptico e ao detector de Si-PIN utilizado. Se o analisador for removido e uma nova varredura for feita, teremos $I_o(\lambda)$, que é a intensidade lançada na fibra com a respectiva forma devido à resposta do sistema óptico e do detector; este resultado é mostrado na Fig. 3.11.

Fazendo a normalização da curva, os efeitos introduzidos pelo sistema óptico serão eliminados. Este procedimento foi executado nesta fibra utilizando para aquisição de dados um microcomputador Unitron. Como este procedimento tomava mais tempo para a realização da medida e não influia no resultado anteriormente obtido, optou-se

somente pelo registro do sinal de saída do "lock-in" na registradora x,t.

A velocidade de varredura utilizada no monocromador foi de 250 Å^o/min, enquanto que a velocidade da registradora na maior parte das medidas, foi de 2,5cm/min, correspondendo portanto a 10 nm/cm.

No gráfico da Fig. 3.10 os valores indicados por λ e $\Delta\lambda$ são, respectivamente, 851,2nm e 12,9nm.

Utilizando-se da Eq. (3.14), o valor calculado do comprimento de batimento foi de 1,65mm, correspondendo, no comprimento de onda $\lambda = 852\text{nm}$, a uma Birrefringência Modal de $5,16 \times 10^{-4}$.

Na fibra de casca elíptica foram realizadas duas medidas para dois comprimentos diferentes de fibra, $L = 161,5\text{mm}$ e $L = 106\text{mm}$, cujos resultados são mostrados nas Figs. 3.12 e 3.13. Como esperado, para uma fibra com o mesmo comprimento de batimento, uma diminuição no comprimento da fibra medida significa um aumento no valor de $\Delta\lambda$. A intensidade mínima transmitida não teve um valor próximo de zero pelo fato desta fibra apresentar luz guiada pela casca, não sendo possível a sua completa eliminação.

Da Fig. 3.13 obteve-se os valores de $\lambda = 852\text{nm}$ e $\Delta\lambda = 54\text{nm}$, significando um comprimento de batimento igual a 6,72mm e a uma Birrefringência Modal igual a $1,26 \times 10^{-4}$. A Birrefringência Modal na fibra de casca elíptica já havia sido medida pelo método do espalhamento Rayleigh, tendo-se obtido $B = 1,22 \times 10^{-4}$, portanto muito próximo do valor aqui obtido.

Com a fibra PANDA (Fig. 3.14), de comprimento $L = 110,6\text{mm}$, obteve-se o menor comprimento de batimento, significando uma maior birrefringência. O valor obtido para o comprimento de batimento foi de 1,19mm no comprimento de onda de 852,3nm.

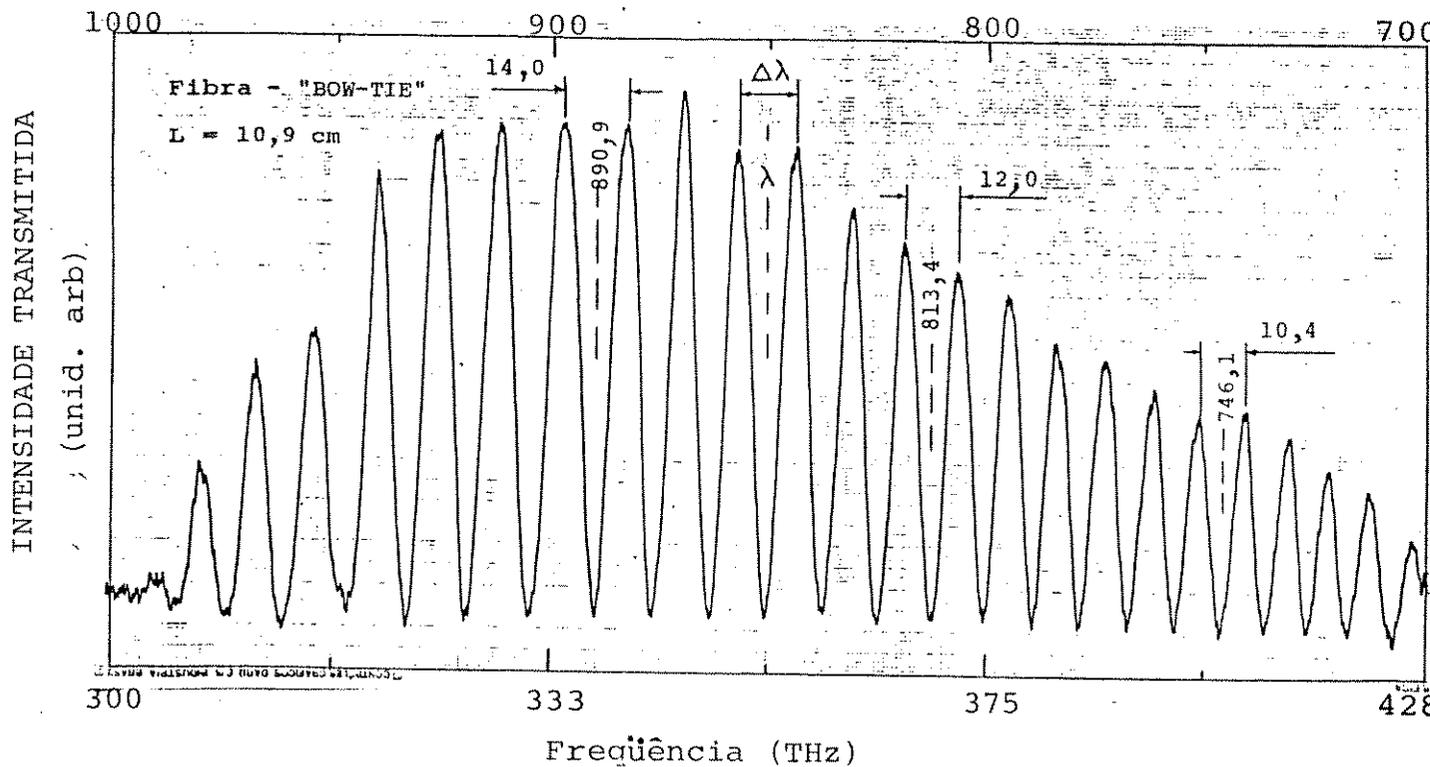


FIG. 3.10 - Variação da intensidade transmitida com a mudança do comprimento de onda em uma fibra "Bow-Tie".

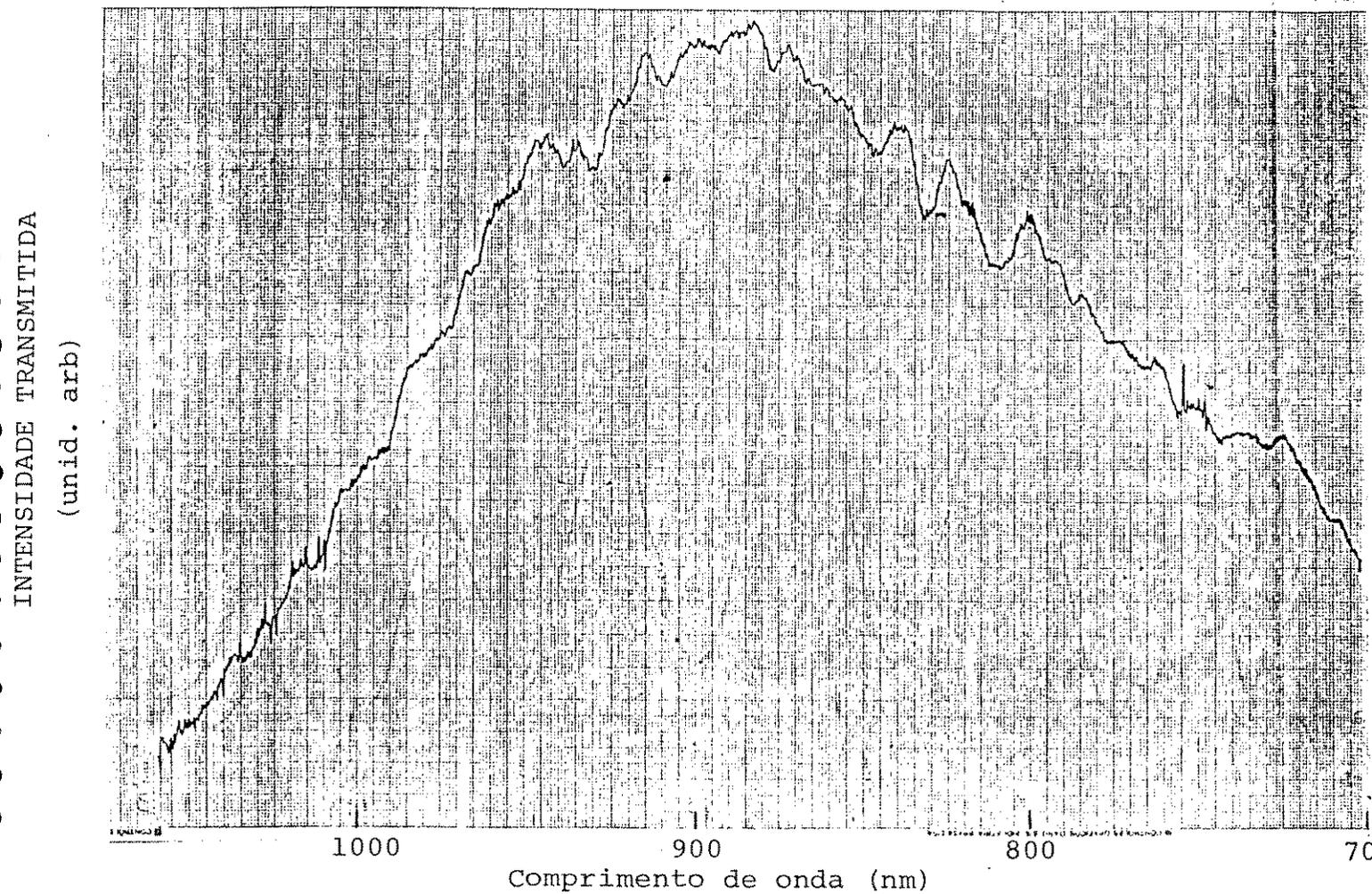


FIG. 3.11 - Variação da intensidade transmitida com a mudança do comprimento de onda, quando o analisador é retirado.

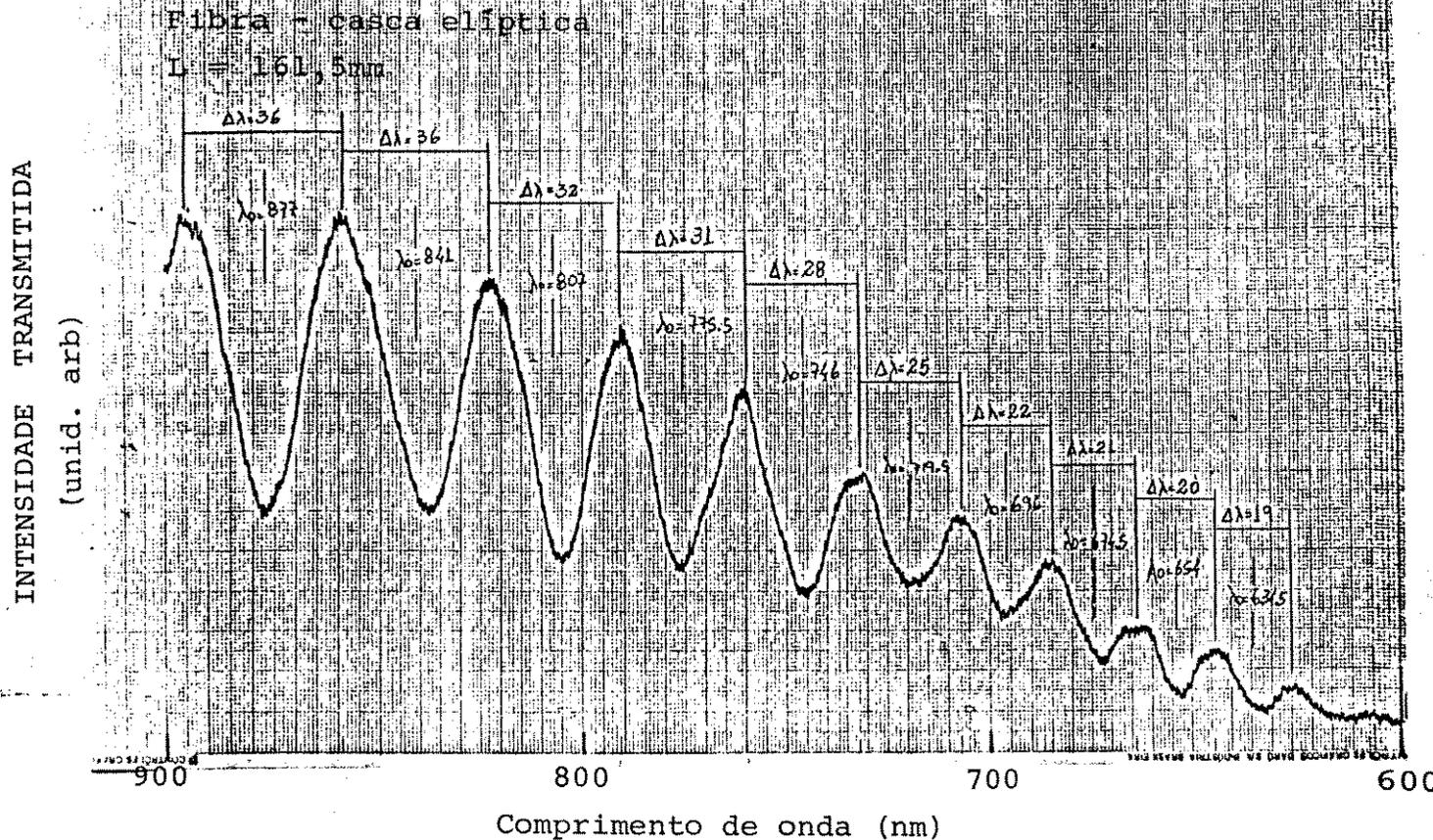


FIG. 3.12 - Variação da intensidade transmitida com a mudança do comprimento de onda em uma fibra de casca elíptica.

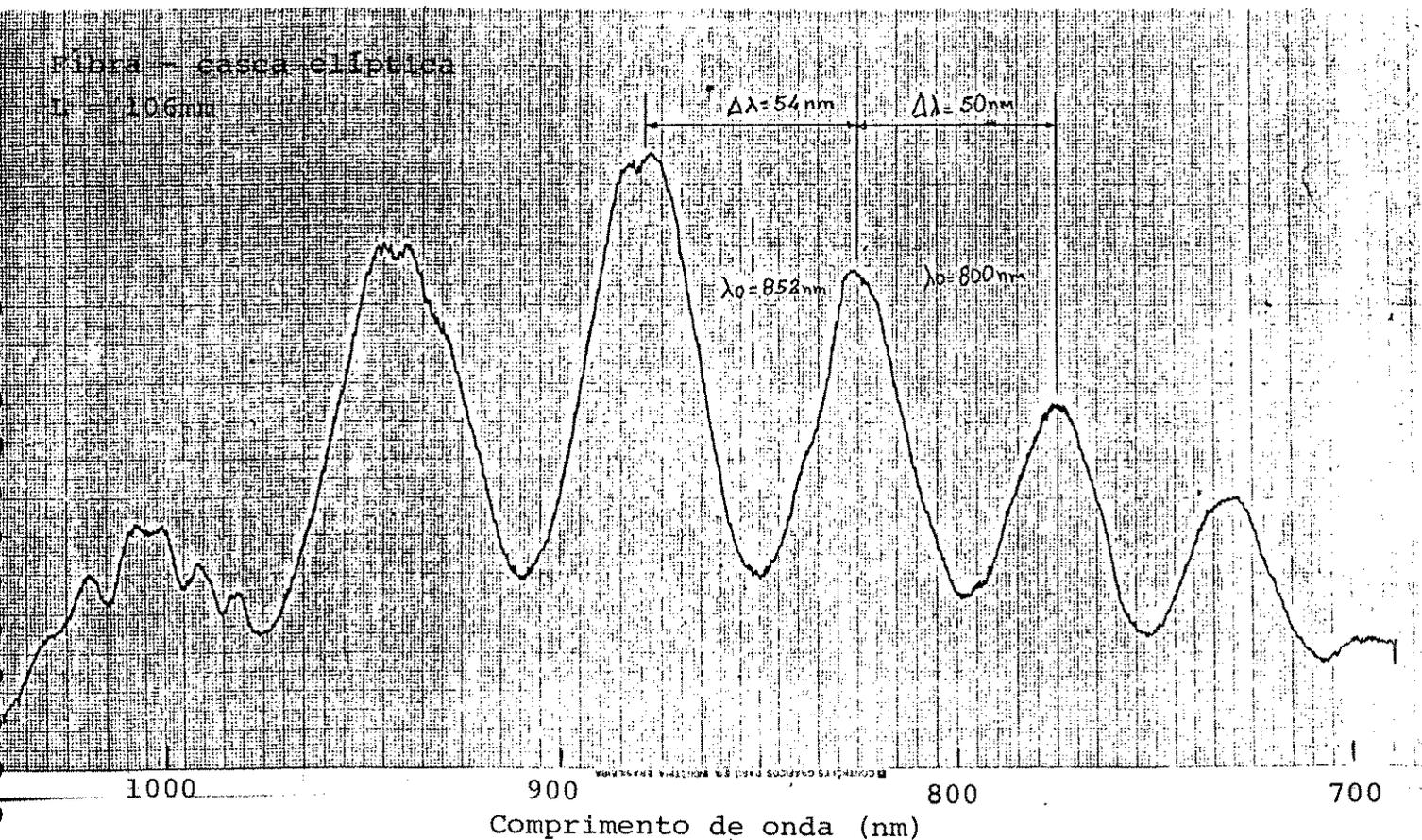


FIG. 3.13 - Variação da intensidade transmitida com a mudança do comprimento de onda em uma fibra de casca elíptica.

Fibra - Panda Fujikura

L = 110,6mm

INTENSIDADE TRANSMITIDA

(unid. arb)

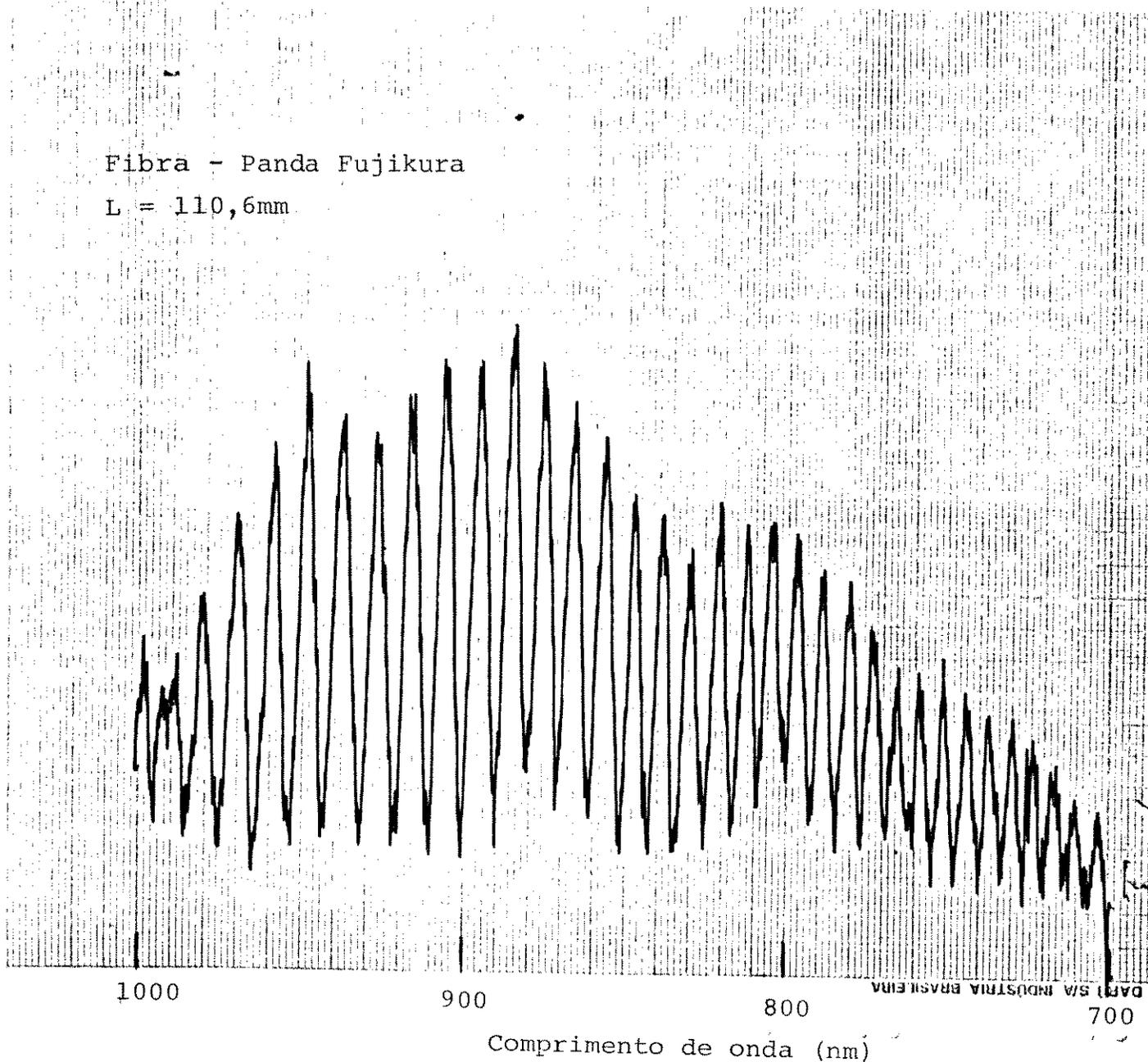


FIG. 3.14 - Variação da intensidade transmitida com a mudança do comprimento de onda em uma fibra PANDA.

Um resumo dos valores obtidos neste método de medida são apresentados na Tabela 3.1, onde são mostrados os comprimentos das fibras utilizadas, bem como valores de λ e $\Delta\lambda$ tirados das curvas obtidas e os valores calculados para o comprimento de batimento e a Birrefringência Modal. Na tabela são apresentados os dois resultados obtidos com a mesma fibra de casca elíptica mas com comprimentos diferentes.

TABELA 3.1

Fibra	L (cm)	λ (nm)	$\Delta\lambda$ (nm)	L_b (mm)	$B \times 10^{-4}$
Panda	11,06	852,3	9,2	1,19	7,16
"Bow-Tie"	10,90	851,2	12,9	1,65	5,16
Casca elíptica	16,15	841,0	32,0	6,91	1,22
Casca elíptica	10,60	852,0	54,0	6,71	1,26

Os valores experimentais de $\Delta\lambda$ e λ , tirados da curva de intensidade da fibra "Bow-Tie" estão listados na Tabela 3.2, assim como os valores calculados do comprimento de batimento e da Birrefringência Modal para cada comprimento de onda. No gráfico da Fig. 3.15 foram plotados os pontos $\Delta\lambda \times \lambda$ e a partir das equações (3.14) e (3.2) chegou-se à seguinte expressão:

$$\Delta\lambda = \lambda^2 / LB \quad (3.15)$$

Com o valor médio da Birrefringência Modal, $B = 5,14 \times 10^{-4}$, foi traçada a curva teórica (linha cheia) usando a equação acima, mostrando um bom casamento entre os dados experimentais e teóricos.

TABELA 3.2

Fibra "Bow-Tie" - L = 109mm

λ (nm)	$\Delta\lambda$ (nm)	L_b (mm)	$B \times 10^{-4}$
707,6	9,2	1,42	4,98
716,8	9,1	1,38	5,19
726,0	9,5	1,42	5,11
735,9	10,1	1,49	4,94
746,1	10,4	1,52	4,90
756,5	10,4	1,50	5,04
767,3	11,2	1,59	4,82
778,5	11,1	1,55	5,02
789,9	11,7	1,61	4,90
801,6	11,7	1,59	5,04
813,4	12,0	1,61	5,05
825,4	12,0	1,58	5,22
838,0	13,3	1,73	4,84
851,2	12,9	1,65	5,16
864,0	12,7	1,60	5,40
877,1	13,6	1,69	5,19
890,9	14,0	1,71	5,21
904,8	13,8	1,66	5,45
919,0	14,6	1,73	5,31
933,3	14,1	1,65	5,65
947,8	14,9	1,71	5,54

$$B_{\text{m\u00e9dia}} = 5,14 \times 10^{-4}$$

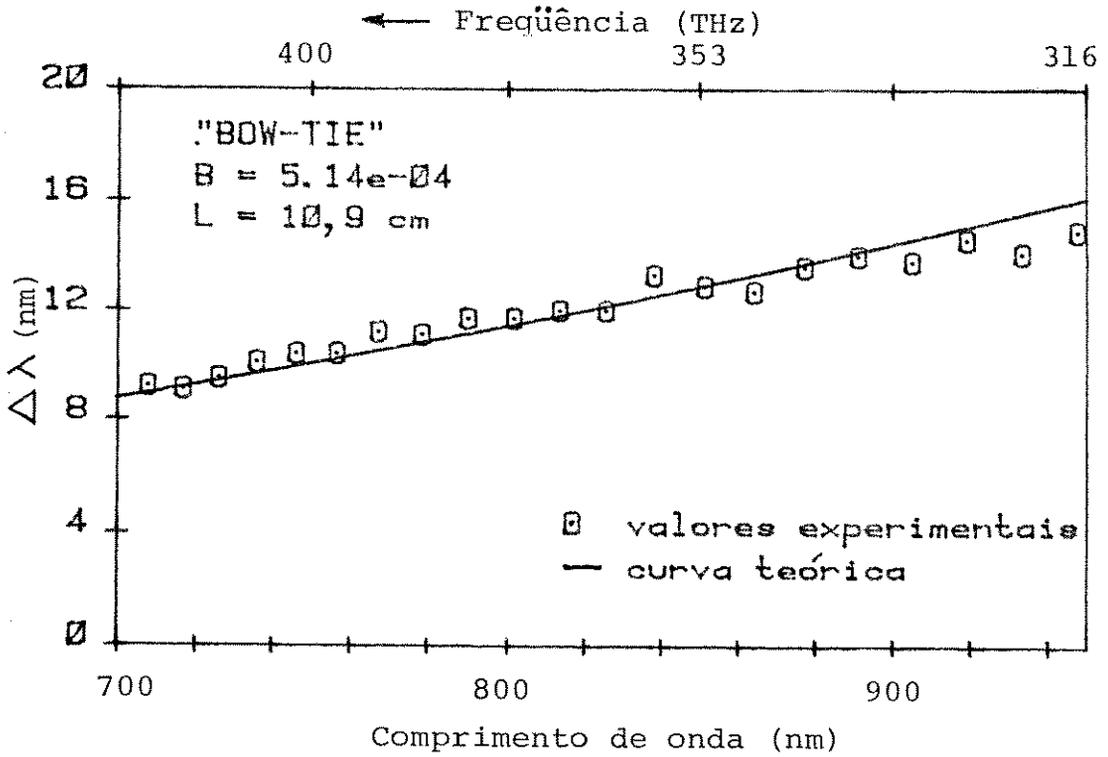


FIG. 3.15. Variação de $\Delta\lambda$ em função da freqüência (ou do comprimento de onda)

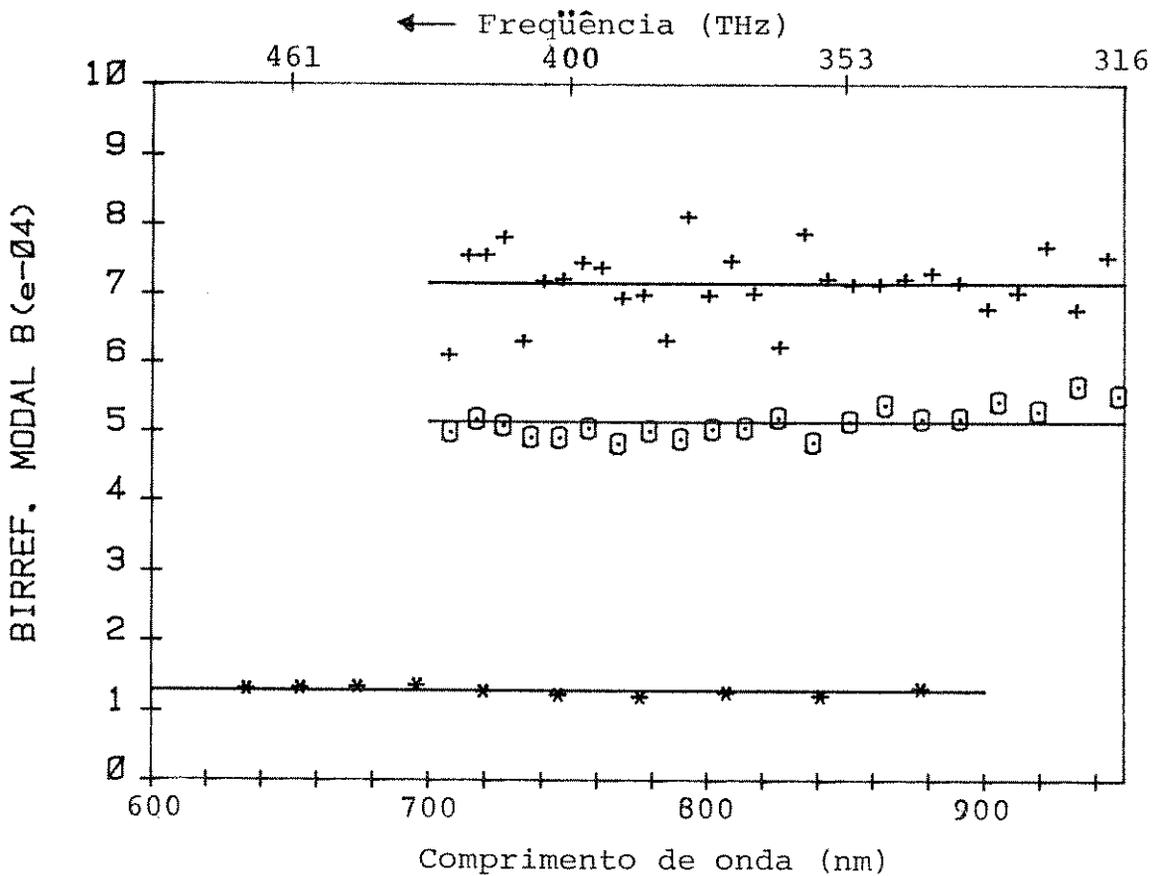


FIG. 3.16. Birrefringência Modal em função da freqüência (ou do comprimento de onda).

(+) PANDA (⊙) "BOW-TIE" (*) CASCA ELÍPTICA
— Valor médio da Birrefringência Modal

A Birrefringência Modal para cada comprimento de onda foi também calculada para as fibras Panda e casca elíptica ($L = 161,5\text{mm}$) como feito para a fibra "Bow-Tie". Os valores obtidos foram traçados na Fig. 3.16, sendo que os pontos representam valores experimentais e a linha cheia o valor médio em cada fibra. Vemos, conforme o assumido, que a birrefringência devido a B_g é independente do comprimento de onda.

3.4. MÉTODO DO CORTE

Quando o lançamento de uma luz linearmente polarizada não coincidir com os eixos principais da fibra óptica, o grau de polarização varia ao longo do comprimento da fibra, sendo esta variação já mostrada na Eq. (2.7) e dada por:

$$P = (1 - \sin^2 2\theta \sin^2 \delta)^{1/2} \quad (3.16)$$

onde:

θ = ângulo de incidência da luz linearmente polarizada em relação ao eixo principal da fibra na direção x

δ = diferença de fase entre os dois modos ortogonais.

Para um ângulo de incidência $\theta = 45^\circ$, a Eq. (3.16) se reduz a:

$$P = (1 - \sin^2 \delta)^{1/2} = |\cos \delta| \quad (3.17)$$

Neste caso a variação do grau de polarização ao longo da fibra irá depender unicamente da diferença de fase entre os modos HE_x e HE_y , sendo que esta variação é periódica e está mostrada na Fig. 3.1.

Como $\delta = \Delta\beta L$, e usando o comprimento de batimento $L_b = 2\pi/|\Delta\beta|$, é possível determinar-se o valor de L_b a partir da medida do grau de polarização no final da fibra pelo uso de:

$$P = |\cos(2\pi L/L_p)| \quad (3.18)$$

O valor do comprimento de batimento não pode ser determinado, numa única medida do grau de polarização, pela natureza periódica da função cosseno. Portanto o ângulo de incidência $\theta = 45^\circ$ deve ser mantido fixo, enquanto o comprimento da fibra a partir do seu final for alterada e nova medida realizada.

Este método do corte ^[24,31,32] será aqui apresentado apenas com simulações teóricas devido à impossibilidade de sua utilização nas fibras de alta birrefringência disponíveis durante este trabalho, pois elas possuem comprimento de batimento menor que 7mm e existe uma grande dificuldade prática para se cortar as fibras em pedaços milimétricos. A grande utilização deste método foi na caracterização das fibras fabricadas durante este trabalho, cujos resultados serão apresentados no Capítulo 6.

A montagem experimental utilizada para fazer esta medida é a mesma usada na medida do grau de polarização mostrada no Capítulo 2. O procedimento para sua realização começa com a localização de um dos eixos principais da fibra. Em seguida o polarizador é girado de 45° e mantido fixo assim como a ponta de lançamento da fibra, que não devem ser movimentados durante todo o processo de caracterização.

Mede-se o grau de polarização na extremidade final da fibra determinando-se as intensidades máxima e mínima com o auxílio do analisador. Depois corta-se a fibra a partir da extremidade final, sendo que o comprimento do pedaço de fibra cortado é medido com o auxílio de um paquímetro, para melhor precisão. Então nova medida do grau de polarização é realizada. Este procedimento de cor-

tar-se a fibra e medir-se seu grau de polarização é realizado várias vezes até que se obtenham dados suficientes para o cálculo do valor do comprimento de batimento.

Para a simulação teórica da utilização deste método foram utilizados dados de uma fibra hipotética, com comprimento de 100mm e Birrefringência Modal de 1×10^{-5} , sendo medida no comprimento de onda de 632,8nm, o que corresponderia a um comprimento de batimento $L_b = 63\text{mm}$.

O resultado obtido é apresentado na Fig. 3.17 e a seguir discutem-se os principais pontos.

Na extremidade inicial da fibra, correspondendo ao comprimento zero, o grau de polarização é unitário, significando o lançamento de uma luz linearmente polarizada. A curva traçada até o comprimento de fibra igual a 100mm foi feita a partir do uso da Eq. (3.18), cujo valor de L_b utilizado foi de 63mm.

Os pontos colocados sobre a curva corresponderiam aos valores do grau de polarização medidos no final da fibra, sendo que a distância entre dois pontos é o comprimento da fibra cortado cuidadosamente. O comprimento de batimento é a distância entre dois máximos alternados. A existência de um máximo intermediário se deve ao fato que nesta posição a diferença de fase é um múltiplo de $(2m + 1)\pi$ radianos, e a luz está linearmente polarizada, tendo portanto grau de polarização unitário.

Devido à dificuldade prática em se montar um sistema de medição entre o polarizador e o analisador, com comprimento maior que dois metros, de tal forma que a fibra não esteja sujeita a birrefringências externas como curvaturas, torção e pressão, ainda utiliza-se a aplicação deste método em fibra com comprimento de batimento maior que dois metros, mas traçando-se os valores da dife-

rença de fase (ou retardo) em função do comprimento da fibra.

A diferença de fase (ou retardo) é dada por:

$$\delta = \cos^{-1}(P) \quad (3.19)$$

O resultado teórico de uma fibra com Birrefringência Modal de $1,0 \times 10^{-7}$, sendo medida em $\lambda = 632,8\text{nm}$, o que corresponderia a um comprimento de batimento de $6,33\text{m}$, foi utilizado para os cálculos.

O resultado obtido com a representação do grau de polarização em função do comprimento da fibra é apresentado na Fig. 3.18 e o valor do retardo na mesma fibra é apresentado na Fig. 3.19. Esta última representação é que será utilizada na caracterização das fibras fabricadas durante este trabalho. No lançamento da luz linearmente polarizada, as componentes HE_x e HE_y têm valor de retardo zero e este irá crescer linearmente em função do comprimento da fibra dependendo somente do valor da Birrefringência Modal.

Na fibra acima, o grau de polarização no comprimento de 100cm foi $P = 0,546$ o que corresponde a um valor de retardo de $\delta = 56,9^\circ$. O comprimento de batimento será dado ao comprimento de fibra em que o valor de retardo for igual a 360° . Neste caso o valor do comprimento de batimento seria de $6,33\text{m}$.

3.5. CONCLUSÃO

Em conclusão a este capítulo serão discutidas as principais vantagens e desvantagens dos métodos apresentados bem como sua região de utilização.

O método do espalhamento Rayleigh é limitado para compri-

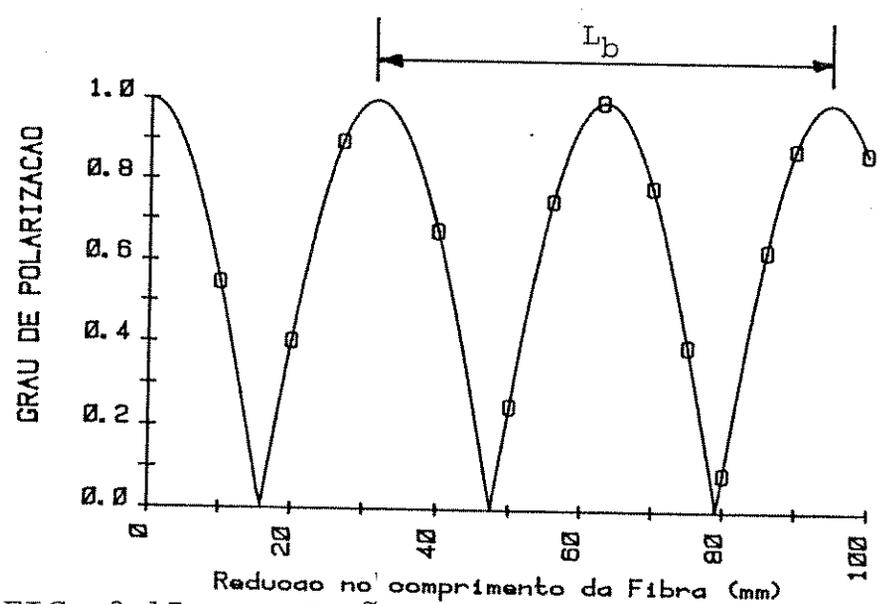


FIG. 3.17 - Variaçao do grau de polarizaçao na saída da fibra quando da reduçao de seu comprimento. Dados teóricos para uma fibra com $B = 1 \times 10^{-5}$, no comprimento de onda $\lambda = 632,8\text{nm}$.

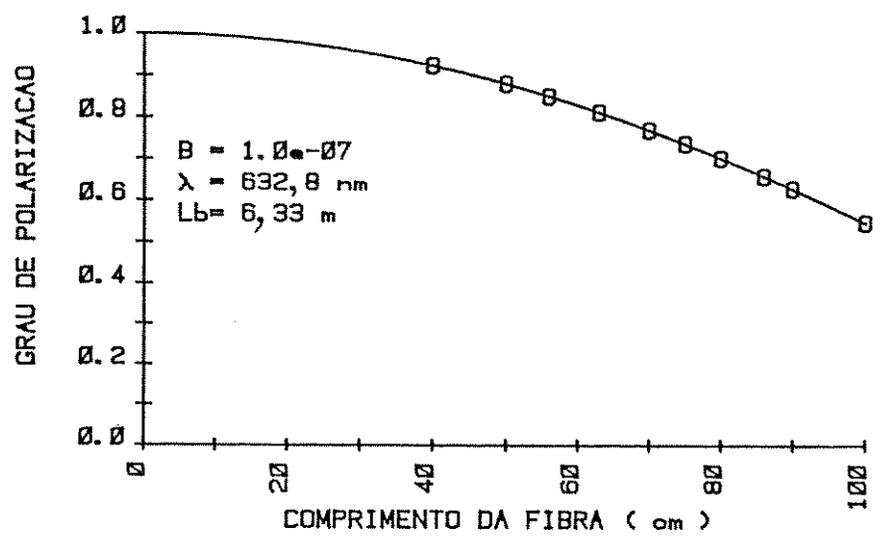


FIG. 3.18 - Variaçao do grau de polarizaçao na saída da fibra em funçao da reduçao de seu comprimento inicial de 1 metro.

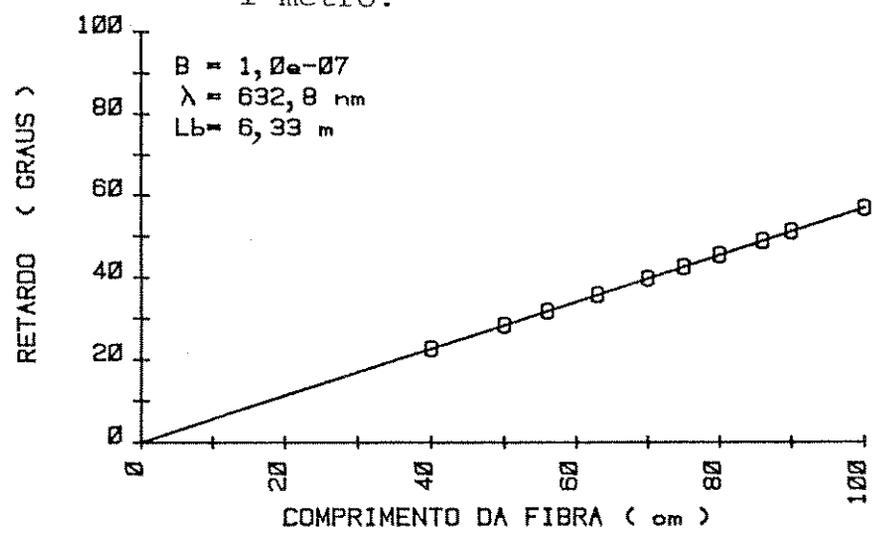


FIG. 3.19 - Variaçao do retardo em funçao do comprimento da fibra.

mentos de batimento entre 1mm e 10cm, devido à dificuldade de localização dos mínimos fora dessa região. Além disso é limitado para comprimentos de onda menores do que $1,0\mu\text{m}$ pela dependência com λ^{-4} do espalhamento Rayleigh. Na região do visível necessita de laser de alta potência para sua visualização ou então a utilização de detectores quando o laser não tiver potência suficiente ou se estiver trabalhando na região do infravermelho próximo, entre $0,7\mu\text{m}$ e $1,0\mu\text{m}$. Mas é um método rápido e prático não necessitando do conhecimento do comprimento da fibra.

O método da varredura em frequência, apesar de usar grande parte da montagem utilizada na medida da atenuação espectral em fibras ópticas, requer um cuidadoso alinhamento entre todos os componentes ópticos, principalmente no conjunto de lançamento composto da objetiva que colima a luz despolarizada da fibra multimodo, o polarizador e a objetiva usada no lançamento da luz linearmente polarizada na fibra sob teste. Este método pode ser aplicado em fibras com comprimento de batimento menor que $0,5\text{m}$.

O método do corte tem como principal desvantagem o fato de ser destrutivo assim como também é o método da varredura em frequência, pois necessitam de comprimentos de fibra de até dois metros. A principal dificuldade deste último método está na constante manipulação da extremidade final da fibra fazendo com que todo sistema de colimação na saída da fibra seja transladado a cada corte no comprimento da fibra. A sua utilização é para comprimentos de batimento maiores que 20mm , devido à dificuldade no corte da fibra em pedaços milimétricos.

Existem na literatura^[11] outros métodos não destrutivos para a medida do comprimento de batimento mas estes três métodos apresentados cobrem toda a variação possível de comprimento de batimento em fibras ópticas monomodo birrefringentes.

CAPÍTULO 4 - FABRICAÇÃO DE FIBRAS ÓPTICAS MONOMODO DE BAIXA BIRREFRINGÊNCIA POR ROTAÇÃO DA PREFORMA

4.1. INTRODUÇÃO

A confecção de fibras ópticas monomodo de baixa birrefringência, através do controle da circularidade assim como do casamento dos coeficientes de expansão térmica dos materiais usados na sua fabricação, não tem boa reprodutibilidade ^{|15|} devido a fatores externos que afetam a birrefringência. Esses fatores, como por exemplo, tensões residuais localizadas no tubo substrato da preforma ou criados durante o processo de confecção da fibra, tornam a birrefringência não uniforme ao longo da fibra.

O método aqui utilizado consiste em confeccionar uma preforma nas condições normais de fabricação ^{|33|} e durante o puxamento, ao invés de manter a preforma parada, somente com o movimento longitudinal de alimentação como ocorre no puxamento das fibras atualmente utilizadas em telecomunicações, introduzir um movimento de rotação sobre seu próprio eixo longitudinal. Este método foi inicialmente sugerido por A.J.Barlow ^{|34|}.

Neste capítulo mostra-se também um resumo dos procedimentos utilizados na fabricação de fibras ópticas, desde o processo de fabricação da preforma pelo método MCVD - "Modified Chemical Vapour Deposition" (Deposição Química por Vapor Modificado) até a descrição da torre de puxamento utilizada neste trabalho.

O sistema utilizado de rotação da preforma foi projetado e desenvolvido durante este trabalho, procurando otimizá-lo antes de sua instalação na torre de puxamento de modo a evitar modificações quando de sua operação.

4.2. PREPARAÇÃO DA PREFORMA

As preformas utilizadas foram feitas pelo método MCVD no laboratório de confecção de preformas da Área de Fibras Ópticas/CPqD/Telebrás.

O método aqui utilizado consiste em confeccionar uma preforma cuja obtenção se inicia pela colocação de um tubo substrato de sílica (SiO_2 - com diâmetro externo de 20mm, comprimento de 500mm e espessura de parede de 2mm) entre dois mandris giratórios e síncronos, em um torno tipo mecânico. Na extremidade esquerda do tubo conecta-se uma linha de gases via uma junta rotatória que deve permanecer livre de vazamentos durante todas as fases do processo. A outra extremidade do tubo é soldada a um tubo de diâmetro maior que serve como coletor do material não incorporado e também está ligado ao sistema de exaustão por onde sairão os sub-produtos.

Um maçarico de $\text{H}_2 + \text{O}_2$ em movimento faz um aquecimento da esquerda para a direita durante todo o processo com uma temperatura aproximada de 1600°C .

Na Figura 4.1 mostra-se uma representação esquemática da deposição química a vapor modificado para fabricação de preformas, onde a passagem de O_2 nos recipientes que contêm os cloretos (SiCl_4 , POCl_3 e GeCl_4) na fase líquida forma uma mistura gasosa cuja concentração e fluxo são controlados. Esta mistura é introduzida no tubo de sílica e, ao atingir a zona de alta temperatura, os cloretos são oxidados e depositam-se na superfície interna do tubo substrato, sendo esta camada depositada um vidro de alta pureza com aproximadamente $10\mu\text{m}$ de espessura.

As 40 primeiras camadas nas preformas utilizadas são constituídas de $\text{F} - \text{P}_2\text{O}_5 - \text{SiO}_2$ tendo índice de refração levemente menor do que o tubo substrato de sílica e constituirão a casca depositada

da fibra. Isto é necessário para assegurar uma casca com baixa atenuação já que parte da luz guiada no núcleo se propaga pela casca. A utilização de P_2O_5 (aproximadamente 1 mol%) é para diminuir a temperatura de fusão do SiO_2 evitando o encolhimento do tubo que ocorreria caso fosse depositado somente SiO_2 . Como o P_2O_5 aumenta o índice de refração da sílica causando a formação de um quia cuja casca seria o tubo substrato, há então a necessidade da deposição de fluor para diminuir o índice de refração a um valor igual ou levemente menor que o do tubo substrato, sendo esta estrutura chamada de perfil de índice casado.

O fluor utilizado na deposição é oriundo de uma linha de freon-12 (CCl_2F_2) paralela à dos cloretos. A concentração de F também é de aproximadamente 1 mol%.

Uma vez terminada esta etapa do processo, inicia-se a deposição do núcleo da fibra; isto é feito com a deposição de duas camadas de $GeO_2 - SiO_2$ cujo valor efetivo de sua composição será obtido a partir do perfil de índice de refração da preforma, o que será visto mais adiante.

Na próxima etapa, o fluxo de gases é interrompido sendo a temperatura elevada em torno de $2000^{\circ}C$ para que o tubo colapse devido à tensão superficial (Fig. 4.2).

A região do tubo onde houve o depósito é cortada com o macho e obtém-se a preforma de diâmetro aproximado de 12mm.

Os tubos substratos utilizados para a fabricação de fibras de baixa birrefringência foram escolhidos entre os que possuíam boa qualidade geométrica. Essas características geométricas são fornecidas pelo fabricante (Heraeus) e os tubos escolhidos possuíam um desvio na espessura ao longo do tubo menor que 0,02mm. Além disso, na preforma, depois de pronta, fez-se uma caracterização ao longo do seu

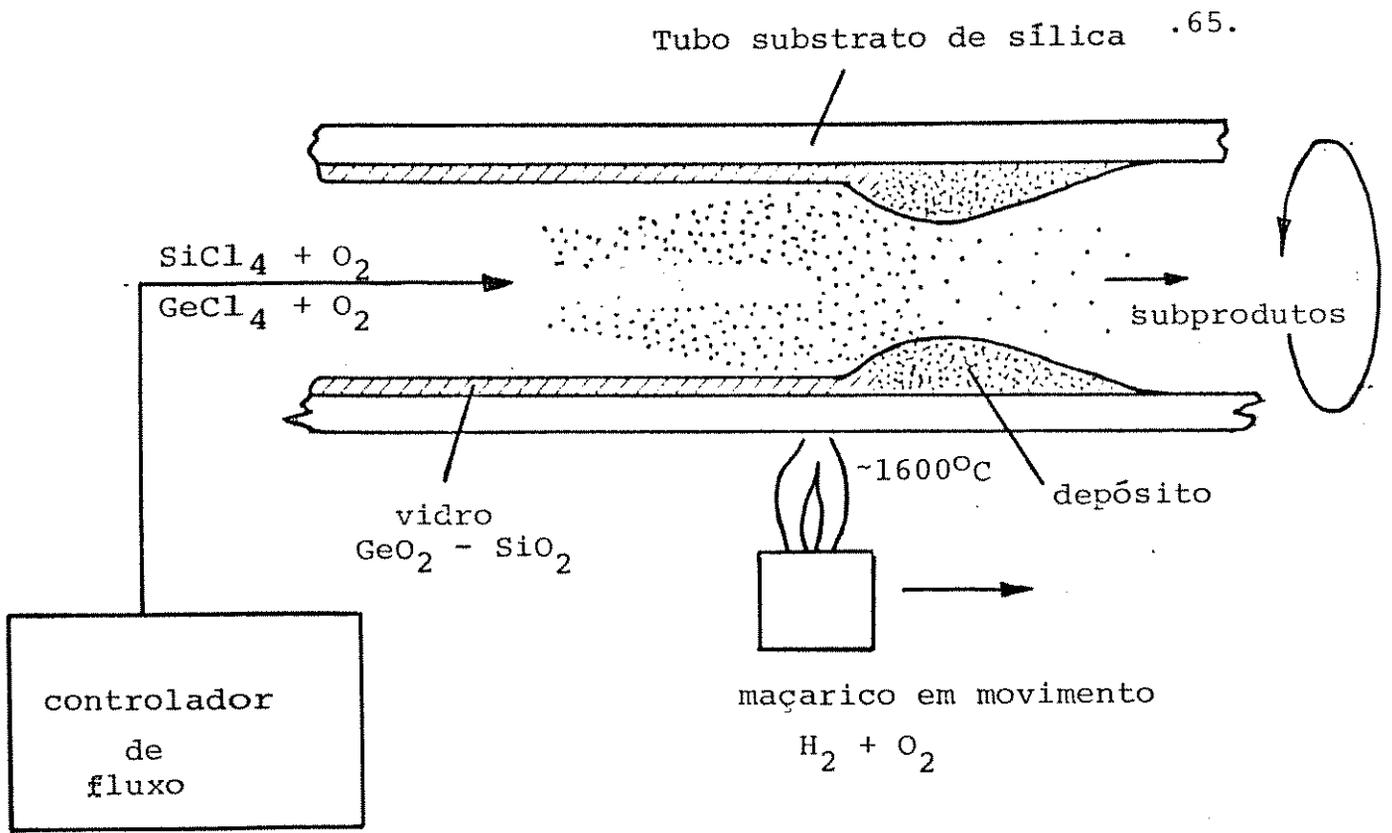


FIG. 4.1 - Representação esquemática da preparação de preforma pelo processo MCVD.

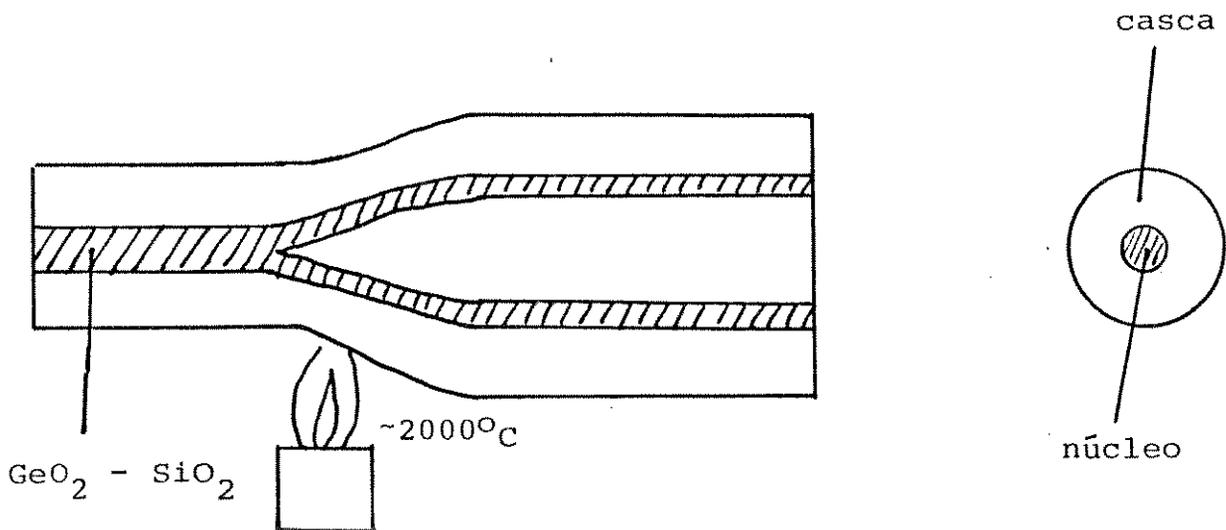


FIG. 4.2- Processo de colapsamento da preforma.

comprimento. Com isso limitou-se para o puxamento, uma região onde a variação de diâmetro fosse menor que 1%.

As preformas são então caracterizadas quanto ao perfil de índice de refração no Analisador de Preformas P-101 da York Technology, no qual um feixe de luz colimado ao atravessar a preforma transversalmente, sofre uma refração de um ângulo que depende do perfil de índice e da posição do feixe em relação à estrutura da preforma.

Nas Figuras 4.3 e 4.4 mostram-se os perfis de índice de refração obtidos de duas das preformas utilizadas. Nelas vemos a variação da diferença de índice de refração em função da distância radial da preforma, mostrando o "dip" central típico do processo MCVD, causado pela evaporação de GeO_2 durante o processo de colapso. Isto faz com que o perfil de índice de refração da fibra monomodo seja diferente do índice degrau ideal, tornando difícil determinar as características de propagação da fibra monomodo com perfil de índice de refração arbitrário. Para tanto apresenta-se um método ^[35] que aproxima este perfil arbitrário para um perfil de índice degrau equivalente (ESI) e a partir do qual as características de propagação na fibra podem ser obtidas.

O índice de refração da fibra pode ser escrito em função do raio r como

$$n^2(r) = n_2^2 + A^2 F(r) \quad (4.1)$$

onde A é a abertura numérica

$$A = (n_{\text{máx}}^2 - n_2^2)^{1/2} \quad (4.2)$$

sendo $n_{\text{máx}}$ = o valor máximo do índice de refração no núcleo

n_2 = índice de refração na casca

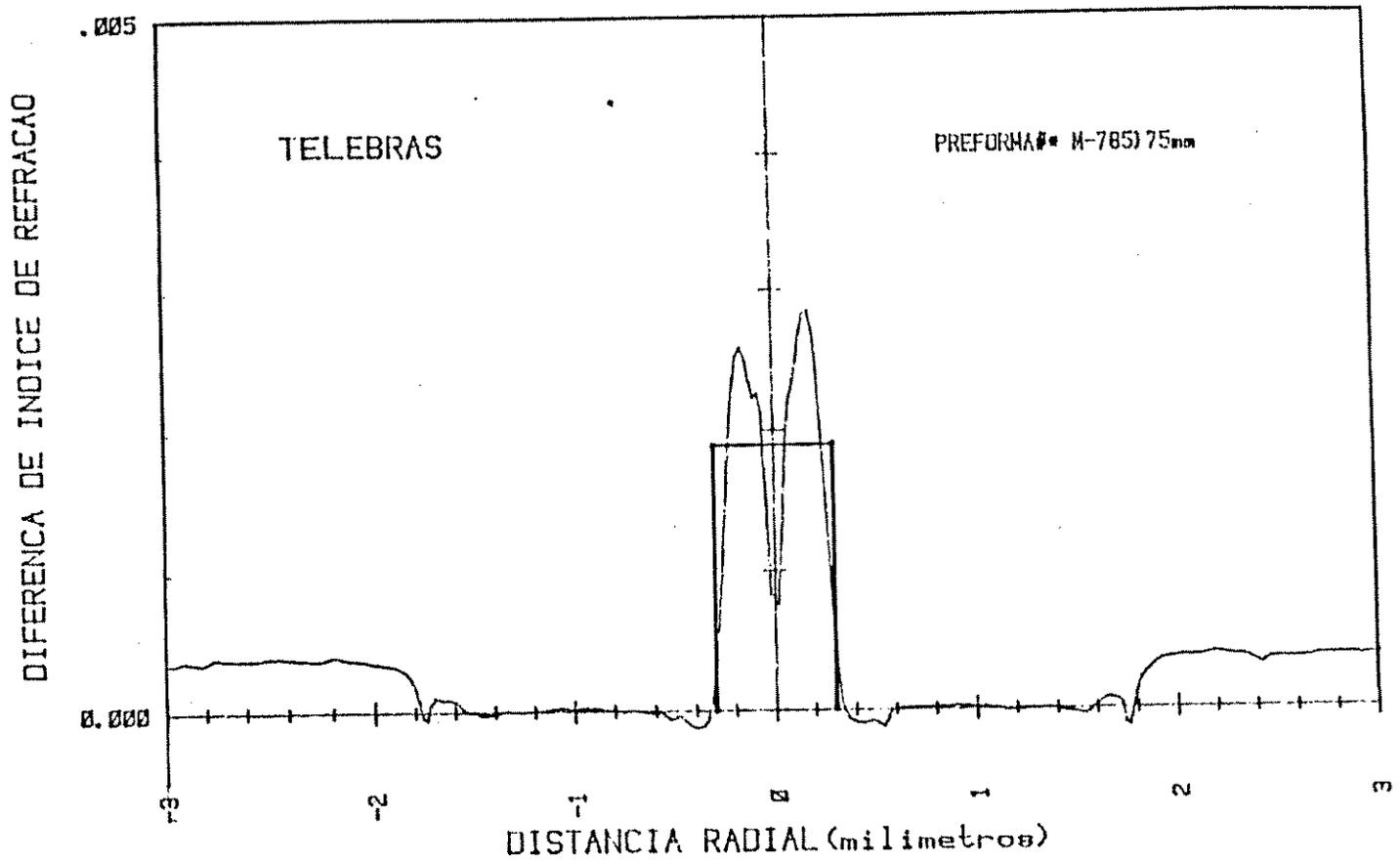
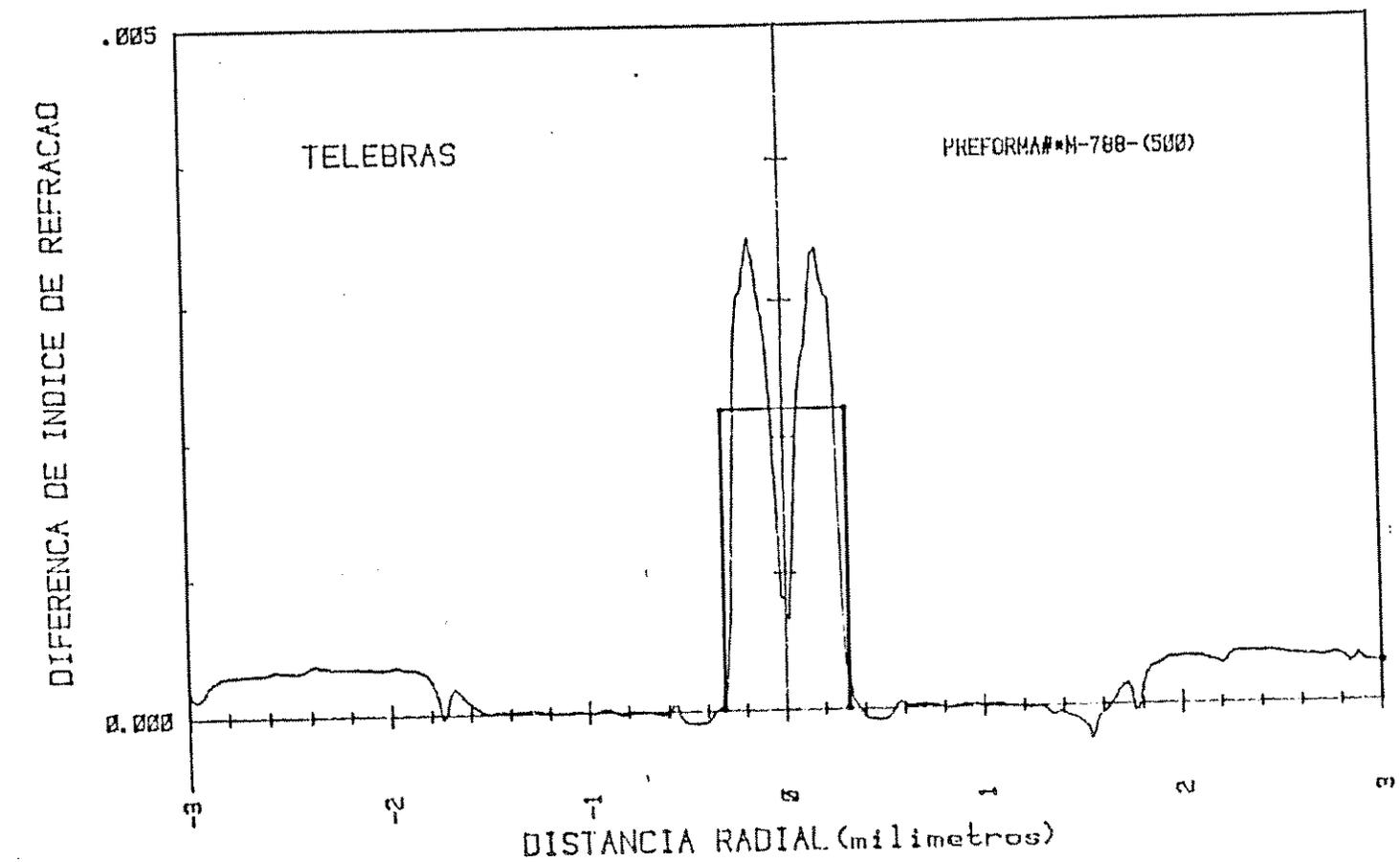


FIG. 4.3 - Perfil de índice de refração da preforma.

INDICE DE REFRAÇÃO-PREFORMA



e $F(r)$ é uma função normalizada do perfil dada por

$$F(r) \equiv (n(r) - n_2) / (n_{\text{máx}} - n_2) \quad (4.3)$$

A partir da distribuição de $n(r)$ os momentos m_0 e m_1 podem ser calculados, onde

$$m_n = \int_0^{\infty} F(r) r^n dr \quad (4.4)$$

Com isso o raio equivalente a_e é dado por

$$a_e = 2m_1/m_0 \quad (4.5)$$

e a abertura numérica equivalente A_e por

$$A_e = A(m_0/a_e)^{1/2} \quad (4.6)$$

A partir desses cálculos efetuados em um microcomputador HP-85, traça-se o perfil de índice degrau equivalente cujos valores calculados servirão de parâmetros para o puxamento da fibra.

A Tabela 4.1 resume os valores obtidos nas preformas utilizadas, entre eles o diâmetro da preforma, a diferença de índice de refração do degrau equivalente, a razão entre o comprimento de onda de corte pelo diâmetro da fibra, sendo que este último é que indicará em qual diâmetro a fibra deve ser puxada para que opere em regime monomodo no comprimento de onda de 633nm.

A partir do perfil de índice de refração da preforma e dos gráficos das Fig. 4.5 e 4.6 onde são mostradas a variação de índice de refração ^{|36|} e dos coeficientes de expansão térmica (Eq. 1.17) para a sílica dopada em função da adição de dopantes (mol%)

utilizados, foi possível estimar o valor da birrefringência na fibra.

TABELA 4.1

Parâmetros obtidos a partir do perfil de índice de refração nas prefor-
mas utilizadas

PREFORMA	DIÂMETRO (mm)	Δn_{e-3} ($\times 10^{-3}$)	λ_c /DIÂMETRO DA FIBRA	DIÂMETRO DA FIBRA (μm) $p/\lambda_c = 0,6\mu\text{m}$
M-784	11,57	3,71	0,00673	89
M-785	12,06	1,89	0,00482	124
M-788	12,08	2,19	0,00541	111
M-789	12,39	2,27	0,00549	109
M-792	12,32	1,84	0,00554	108
M-793	12,44	2,83	0,00717	139*

* para $\lambda_c = 1,0\mu\text{m}$

Como visto, a birrefringência total será a soma das contribuições devido à geometria e a tensões mecânicas. Utilizando-se da Eq. 1.18, $B_g = e n_1 \Delta^2 G(V)$ e, para o comprimento de onda de $0,633\mu\text{m}$ a ser utilizado nas medidas, os valores de n_1 e Δ^2 são, respectivamente, $1,460$ e $4,2 \times 10^{-6}$ para a preforma M-785. Usando $G(2,4) = 0,42$ e assumindo $e < 0,1$, o valor esperado da birrefringência será de $B_g < 2,6 \times 10^{-7}$.

A dopagem efetiva de GeO_2 na sílica é obtida a partir do valor do índice de refração no núcleo $n_1 = 1,460$ e do gráfico da Fig. 4.5, correspondendo neste caso a uma dopagem de $1,5 \text{ mol\%}$.

Quanto à birrefringência devido a tensões mecânicas, e para vidros binários, o mesmo procedimento seria usado para se encontrar o valor da dopagem efetiva na casca depositada. A partir deste valor da dopagem e do gráfico da Fig. 4.6 obtém-se o coeficiente de expansão térmica α_1 . Este procedimento para estimar a birrefringência devido a tensões mecânicas seria para preformas com estruturas assimétricas; no caso das preformas utilizadas, elas possuem simetria circular e espera-se que as tensões ocasionadas pelos diferentes coeficientes de expansão térmica do tubo substrato e da estrutura núcleo/casca depositada estejam atuando com uma distribuição radial simétrica e, portanto, não introduzindo birrefringência devido a tensões mecânicas. Com isso a birrefringência intrínseca esperada será menor que $2,0 \times 10^{-7}$.

4.3. TORRE DE PUXAMENTO

A torre de puxamento utilizada é uma estrutura de aproximadamente 7 metros de altura, cujos componentes essenciais estão detalhados nas Fig. 4.7 e 4.9(a) e onde o sistema de alimentação é utilizado para levar a preforma até a zona quente e alimentar o processo durante o puxamento da fibra. No puxamento das fibras convencionais, um sistema de mandril é usado para prender a preforma no alimentador; no presente trabalho o sistema de mandril foi substituído pelo sistema de rotação que será descrito logo mais. Uma fotografia do carro de alimentação com o sistema de rotação é mostrada na Fig. 4.9(b).

Para aquecimento da preforma usa-se um forno de resistência de grafite que eleva a temperatura da preforma em torno de 2000°C , onde ocorre o afinilamento para formar a fibra.

Mede-se o diâmetro da fibra logo abaixo da região de afuni-

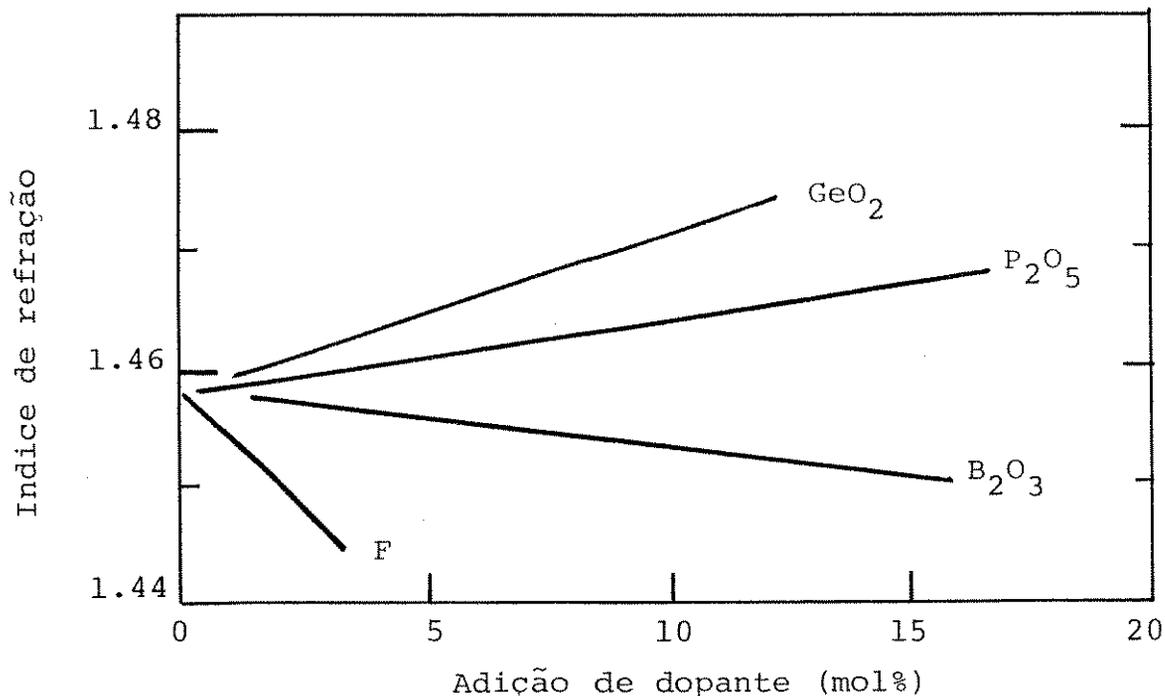


FIG. 4.5 - Variação no índice de refração da sílica dopada em função da adição de dopante.

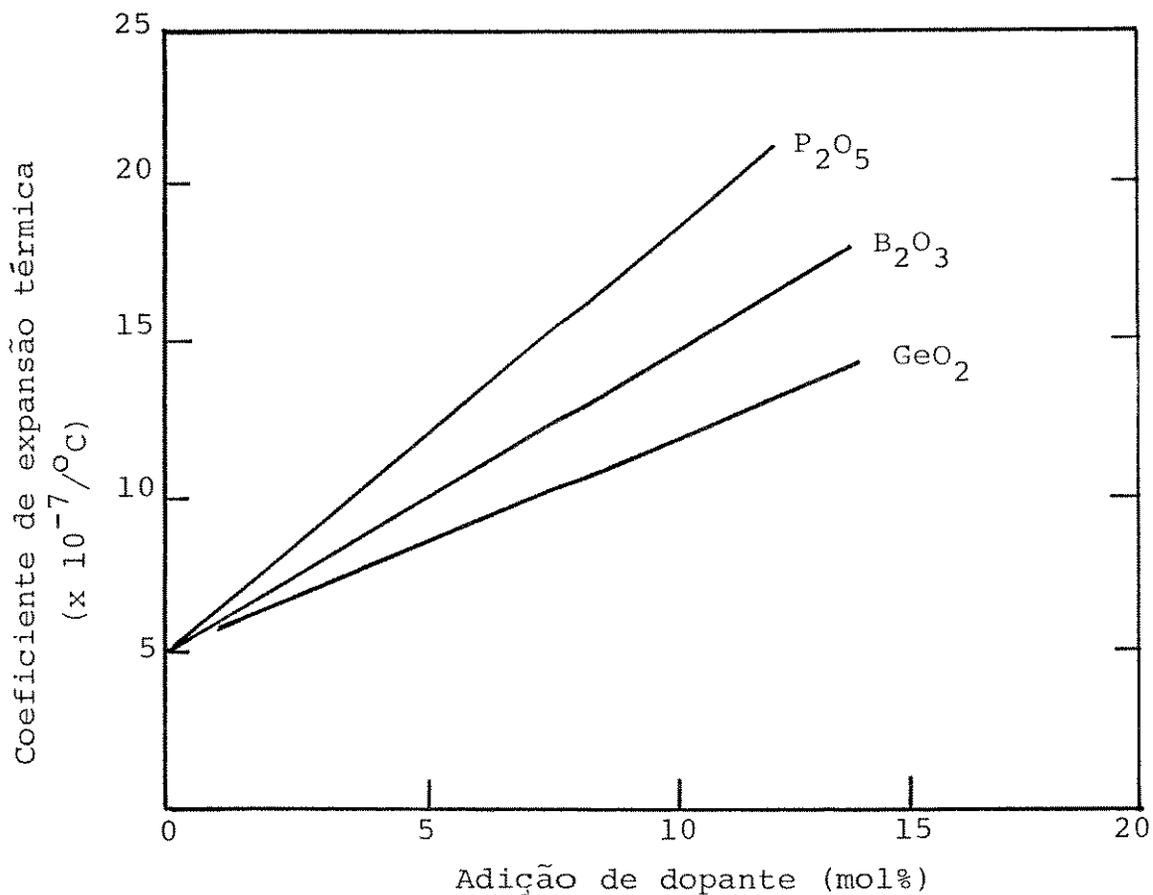


FIG. 4.6 - Variação no coeficiente de expansão térmica da sílica dopada em função da adição de dopante.

lamento por um sistema de medição que utiliza um laser de He-Ne, sendo que o valor medido é utilizado no sistema de realimentação que o compara com o diâmetro desejado. O sinal de saída gerado no controlador, atua na velocidade do mecanismo de puxamento da fibra de tal forma que o diâmetro da fibra mantenha-se constante em torno do valor desejado, com uma variação de $\pm 1,0\mu\text{m}$.

O diâmetro da fibra é calculado por conservação de massa e é dado por

$$D_f = D_p (V_p/V_f)^{1/2} \quad (4.7)$$

onde:

D_f = diâmetro da fibra

D_p = diâmetro da preforma

V_p = velocidade de alimentação da preforma

V_f = velocidade de puxamento da fibra.

Logo após o sistema de medida de diâmetro, coloca-se um revestimento primário de acrilato sobre a fibra com a função de preservar a alta resistência intrínseca da fibra de sílica, evitando que contaminação e defeitos mecânicos destruam essa propriedade.

O revestimento utilizado nas fibras de baixa birrefringência consiste de um polímero de uretano-acrilato cuja cura faz-se por radiação ultravioleta. Este acrilato possui índice de refração igual a 1,54, que é maior que o da sílica, tendo portanto a vantagem de eliminar a luz que esteja sendo guiada pela casca da fibra.

A fibra, depois de passar por um medidor de tensão e pelo mecanismo de puxamento, é enrolada em uma bobina de isopor, ficando assim acondicionada para as etapas de caracterização.

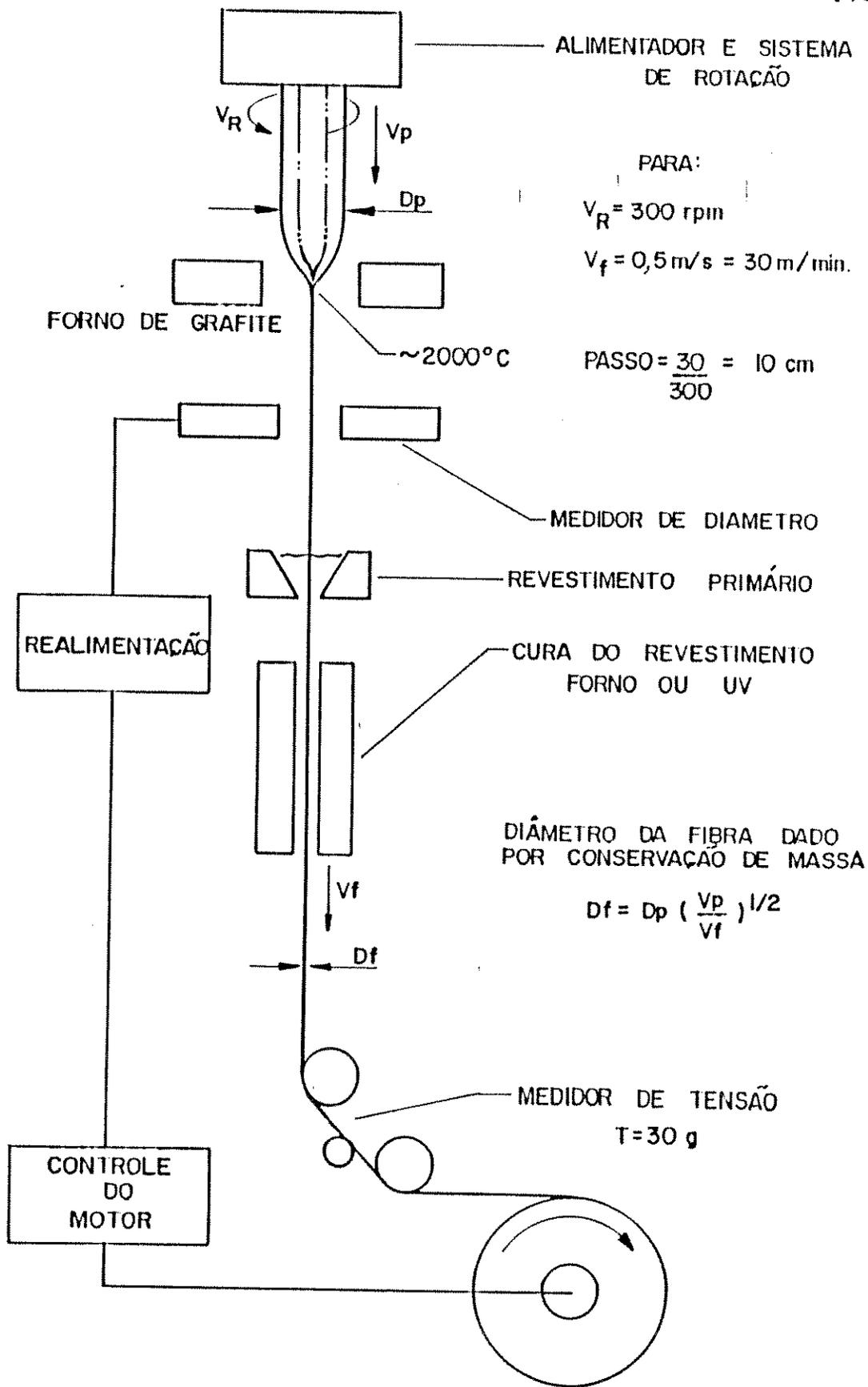


FIG. 4.7 - Representação esquemática da torre de puxamento.

4.4. DESCRIÇÃO DO SISTEMA DE ROTAÇÃO

O sistema de rotação da preforma utilizado para o puxamento da fibra de baixa birrefringência foi construído durante este trabalho e está mostrado em detalhes na Fig. 4.8 e na fotografia da Fig. 4.9(c).

O conjunto total apresenta as seguintes características:

- suporte tipo cantoneira, com reforço central para diminuir flexão. Este suporte foi preso diretamente no carro de alimentação da preforma;
- sistema de translação X-Y para posicionamento da preforma na zona quente, tendo um deslocamento de até 10mm em cada eixo. Este sistema esteve apoiado em três pontos ajustáveis que permitiram uma variação angular para correção de possíveis desalinhamentos nas peças empregadas;
- suporte para o mancal do eixo de rotação e também utilizado como alojamento para o motor DC;
- motor DC da Electrocraft Corporation, modelo E350MGH com torque de 1,5 in.lbs e velocidade variável de até 250rpm;
- sistema principal de rotação que consistia de um eixo único assentado em um mancal de rolamentos, sendo que em uma das extremidades foi feito um cone interno para colocação de uma pinça autocentrante de diâmetro interno igual a 12mm, utilizado para prender o tubo que estava emendado na preforma. A outra extremidade do eixo foi acoplada ao motor DC através de uma junta universal, podendo assim o eixo girar livremente sem nenhum esforço assimétrico.

Este sistema, em princípio, poderia ter um bom desempenho dependendo somente da circularidade ao longo da preforma e da qualidade da emenda entre a preforma e o tubo de extensão usado como prolongamento para levar a preforma até a região de aquecimento dentro

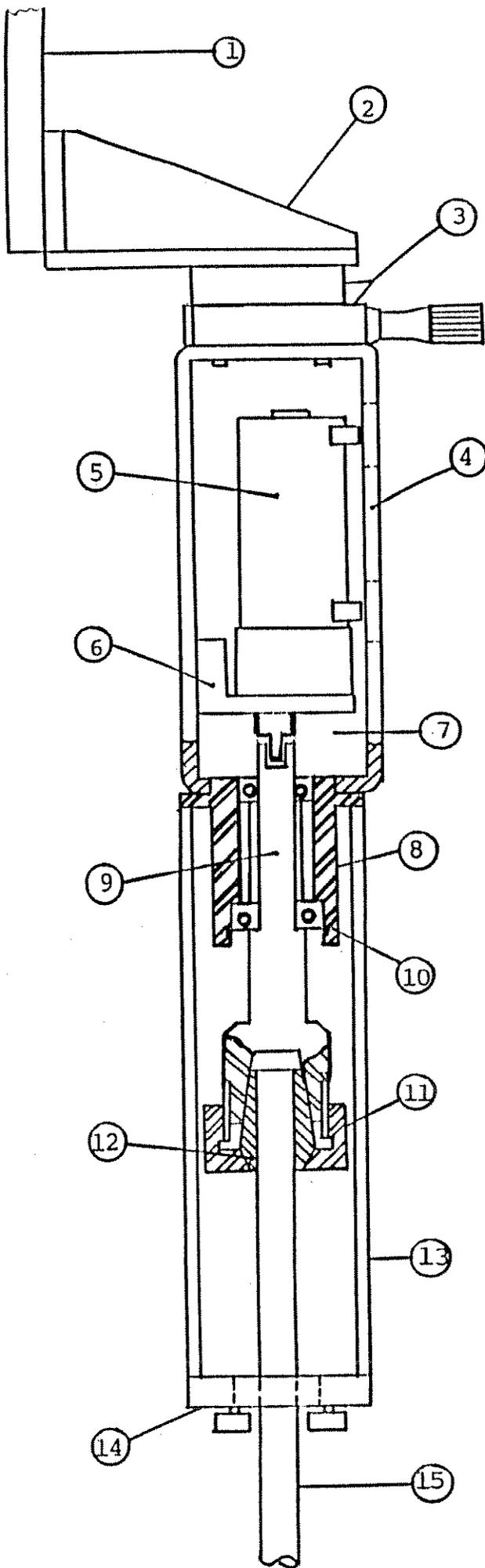
do forno de grafite.

Nos testes realizados, usando um tarugo de latão retificado de diâmetro 12mm por 250mm de comprimento, a descentralização na extremidade livre do tarugo chegava até 0,2mm, enquanto que perto da pinça de fixação era de apenas 0,01mm. Isto ocorreu devido a um desalinhamento durante a usinagem do cone e como o comprimento da preforma mais o tubo de extensão chegaria até 500mm e esta descentralização aumentava em direção da extremidade livre, houve então a necessidade de minimizar essa descentralização que poderia, a priori, afetar o puxamento da fibra.

A solução adotada foi a montagem de um sistema de luneta, similar às utilizadas em torno mecânico e usadas para torneamento de peças onde o comprimento da peça a ser usinada é maior do que doze vezes o seu diâmetro.

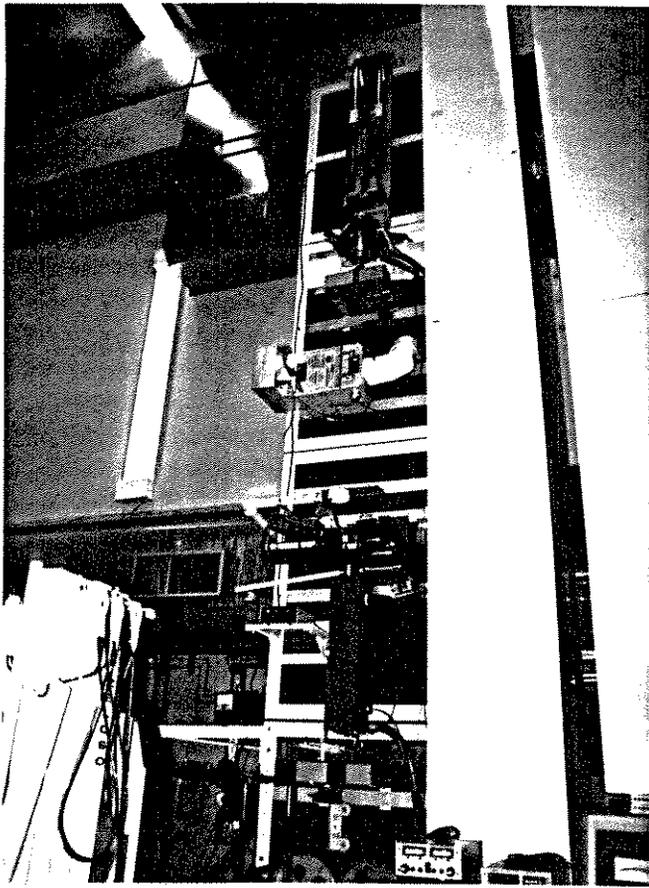
O sistema de luneta mostrado nas Fig. 4.9(d) e 4.10 consistia de três peças que se movimentavam dentro de um rasco feito no anel de suporte e cujo movimento é feito através de um parafuso que ajustava a posição radial de cada peça separadamente. Na extremidade interna de cada peça foi colocado um rolamento de 13mm de diâmetro externo com espessura de 5mm que eram os pontos de apoio no tubo de extensão. A utilização de rolamentos ao invés de pontos fixos como normalmente utilizados nos sistemas de luneta convencionais, deve-se ao fato que a pressão necessária dos pontos fixos sobre o tubo de quartzo riscaria este último até a sua ruptura, o que não ocorre com a utilização dos rolamentos pois estes giram junto com o tubo de quartzo.

A luneta foi colocada por meio de quatro extensões feitas de um tarugo de alumínio de 9,5mm presas no suporte do motor, a uma distância de 100mm da pinça de fixação. Com esse sistema de luneta

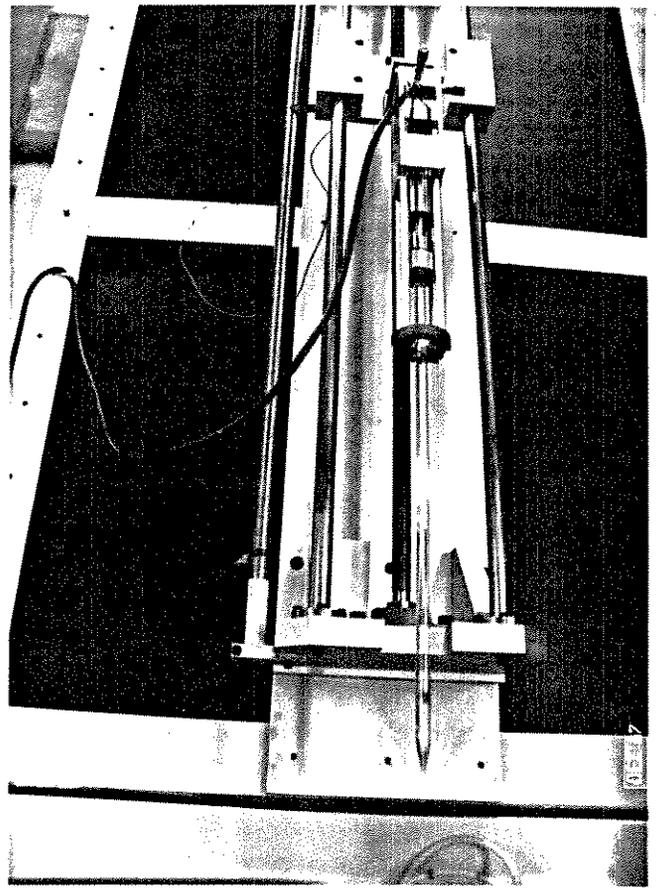


- 1 carro alimentador da preforma
- 2 suporte tipo cantoneira
- 3 transladores X-Y
- 4 suporte para mancal
- 5 motor DC
- 6 apoio do motor
- 7 junta universal
- 8 mancal
- 9 eixo de fixação da preforma
- 10 rolamento
- 11 porca de fixação
- 12 pinça
- 13 haste de prolongamento
- 14 sistema de luneta
- 15 preforma

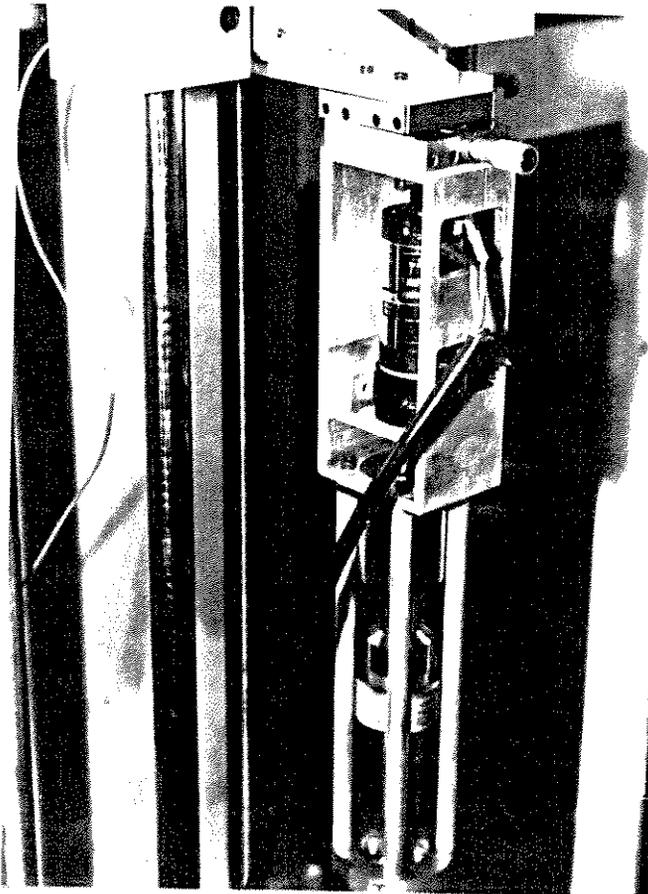
FIG. 4.8 - Sistema utilizado na rotação da preforma, para fabricação de fibras com batua birrefringência



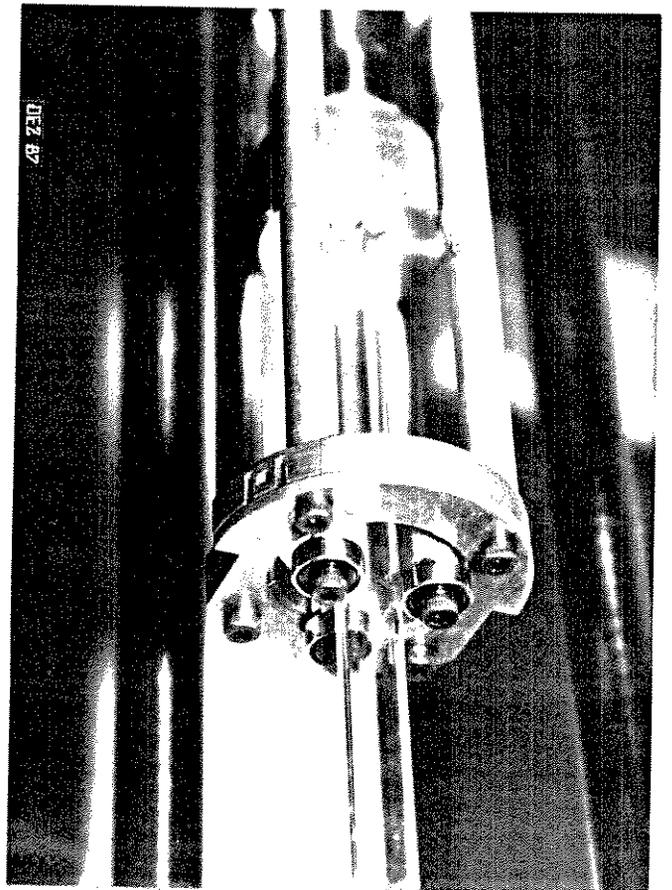
a) Torre de Puxamento



b) Carro de alimentação da preforma



c) Sistema de rotação da preforma



d) Sistema de luneta.

FIG. 4.9 - Fotografias dos sistemas utilizados para o puxamento de fibras de baixa birrefringência por rotação da preforma.

foi possível minimizar a descentralização.

A torre de puxamento utilizada para o puxamento das fibras de baixa birrefringência é a mesma descrita anteriormente, sendo que a única mudança efetuada foi a colocação do sistema de rotação da preforma no carro alimentador em substituição ao mandril usado anteriormente para prender a preforma. Isto foi necessário para não atrasar outros trabalhos em desenvolvimento que utilizavam a mesma torre de puxamento. Portanto o sistema de rotação necessitava ter dimensões reduzidas para não haver necessidade de mudanças no carro alimentador de preformas o que causaria grandes trabalhos de usinagem na torre de puxamento. Com isso o único motor disponível, de baixo peso e dimensões reduzidas, que poderia ser preso diretamente no carro alimentador da preforma foi utilizado, apesar de sua limitação na velocidade máxima de rotação de 250 rpm.

4.5. PUXAMENTO DE FIBRAS MONOMODO DE BAIXA BIRREFRINGÊNCIA

Para o puxamento das fibras de baixa birrefringência pelo método de rotação da preforma foram utilizadas seis preformas cujas características foram listadas na Tabela 4.1.

Como os componentes ópticos a serem utilizados nas medidas da birrefringência eram para $\lambda = 632,8\text{nm}$, havia a necessidade de que estas fibras tivessem o comprimento de onda de corte $\lambda_c < 633\text{nm}$ e como esse controle pode ser feito pelo diâmetro da fibra, não houve preocupação com a otimização do perfil de índice de refração da preforma, de tal forma que o diâmetro externo da fibra fosse o padrão de $125\mu\text{m}$.

Exigiu-se unicamente, que a diferença de índice de refração fosse pequena para não se obter um aumento na birrefringência intrínseca, como visto anteriormente.

Depois da caracterização do perfil de índice de refração e do cálculo do valor do diâmetro em que a fibra deveria ser puxada, a preforma foi caracterizada quanto à uniformidade do diâmetro ao longo de seu comprimento. A região onde essa variação foi menor que 1% foi marcada para ser puxada.

O processo de puxamento da fibra de baixa birrefringência se inicia prendendo e fazendo os ajustes necessários para uma boa centralização da preforma no sistema de rotação. Nestas condições, o início de puxamento é feito usando os mesmos procedimentos utilizados na fabricação das fibras atuais para telecomunicações. Quando as velocidades de puxamento da fibra (V_f) e de alimentação da preforma (V_p) estão estáveis, assim como a tensão de puxamento (T), o sistema de rotação é ligado, aumentando-se lentamente a velocidade para o valor desejado.

Os testes realizados, primeiro com um tubo de sílica e depois com a preforma M-784, onde foram feitas variações nas velocidades de rotação da preforma (V_r), assim como em V_f e V_p durante o puxamento, não introduziram nenhum problema no processo, como variação na tensão de puxamento e oscilações do diâmetro da fibra.

Isto deve ser creditado primeiramente à qualidade já conhecida da torre de puxamento utilizada, depois na qualidade geométrica da emenda e da preforma e por fim nas precauções tomadas na construção do sistema de rotação da preforma.

Para a escolha do valor do passo de rotação foi escolhido, para a maioria dos puxamentos, o valor de $p = 5\text{cm}$ em função dos resultados teóricos a serem mostrados no Capítulo 5, assumindo alguns valores para a birrefringência intrínseca que, até então, não havia sido medida em nenhuma fibra feita anteriormente.

Os valores de $p = 5\text{cm}$ e 2cm estavam também limitados pela

máxima velocidade de rotação da preforma (de 250rpm) imposta pelo motor utilizado. Com isso as velocidades de puxamento da fibra, como as de alimentação da preforma, estavam muito abaixo da região ótima de operação dos motores empregados na torre de puxamento.

A velocidade de puxamento da fibra para se obter o passo desejado devia obedecer a

$$V_f = V_r \times p \quad (4.8)$$

Na Fig. 4.11 é mostrada a relação entre a velocidade de puxamento da fibra e a velocidade de rotação da preforma para alguns valores do passo de rotação utilizados neste trabalho. Procurou-se portanto, sempre trabalhar com V_r máximo para que as velocidades de puxamento e de alimentação da preforma se aproximassem dos valores utilizados normalmente, que, para a velocidade da fibra, são maiores que 30m/min.

A velocidade de alimentação da preforma em função dos parâmetros utilizados passa então a ser expressa por

$$V_p = V_r \times p \left(\frac{D_f}{D} \right)^2 \quad (4.9)$$

As fibras que foram puxadas com o diâmetro menor que 112 μ m foram feitas sem o controle de realimentação de diâmetro pelo fato do medidor do diâmetro não estar atuando abaixo dessa faixa. Isto não trouxe nenhum problema porque a variação de diâmetro na preforma tinha sido limitada em 1%.

No final do puxamento de todas as fibras, o sistema de rotação era desligado e o puxamento continuava por mais 100 metros. Isto foi feito para possibilitar a comparação da birrefringência entre

a região com e sem rotação de preforma.

Na Tabela 4.2 estão apresentados os valores dos principais parâmetros utilizados durante o puxamento. Dentre eles o comprimento útil de fibra fabricada girando a preforma, o diâmetro de cada preforma (que na maioria delas situou-se em torno de 12mm) e também as velocidades de rotação, puxamento da fibra e alimentação da preforma.

TABELA 4.2

Parâmetros utilizados no puxamento das fibras monomodo fabricadas por rotação da preforma

Fibra	L(km)	\varnothing fib. (μ m)	V_r (rpm)	V_f (m/min)	p(cm)	V_p (m/min)	\varnothing pref. (mm)	T(g)
M-784	0,24	91	250	12,6	5,04	0,77	11,57	25
	0,24	91	250	25,0	10,0	1,52	11,57	35
	0,24	91	50	25,0	50,0	1,52	11,57	35
M-785	1,00	121	250	12,90	5,16	1,30	12,06	-
M-788	1,20	104	250	5,37	2,15	0,40	12,08	10
M-789	2,54	108	250	12,50	5,00	0,94	12,39	18
M-792	1,70	110	250	12,50	5,00	0,90	12,32	22
M-793	1,60	132	250	12,50	5,00	1,40	12,44	30

O importante parâmetro nesta tabela é o passo de rotação que foi utilizado em cada fibra, já que este irá reduzir a amplitude máxima do retardo causado pela birrefringência intrínseca da fibra.

A troca do motor utilizado por outro com maior velocidade é necessária para poder aumentar a velocidade de puxamento da fibra

mantendo o passo em valores pequenos.

Na fibra M-788 o tempo gasto para o puxamento de 1,2km foi de quase 4 horas, imposto pelo limite de velocidade da rotação do motor e pelo passo de 2,15cm utilizado.

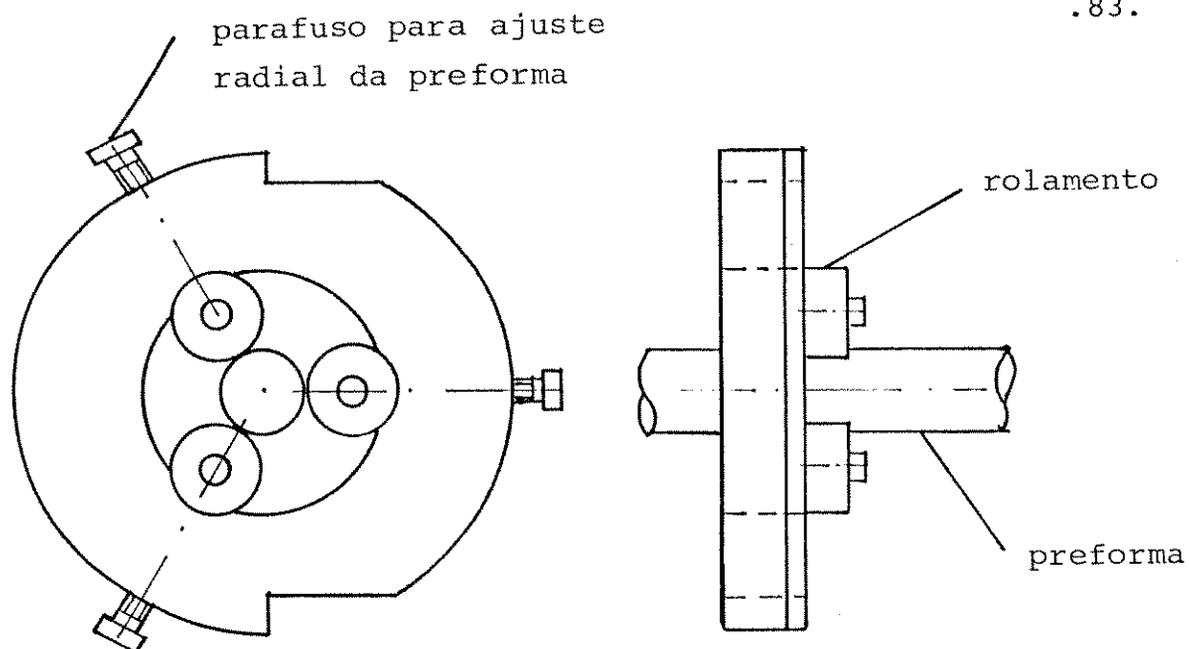


FIG. 4.10 - Desenho esquemático do sistema de luneta.

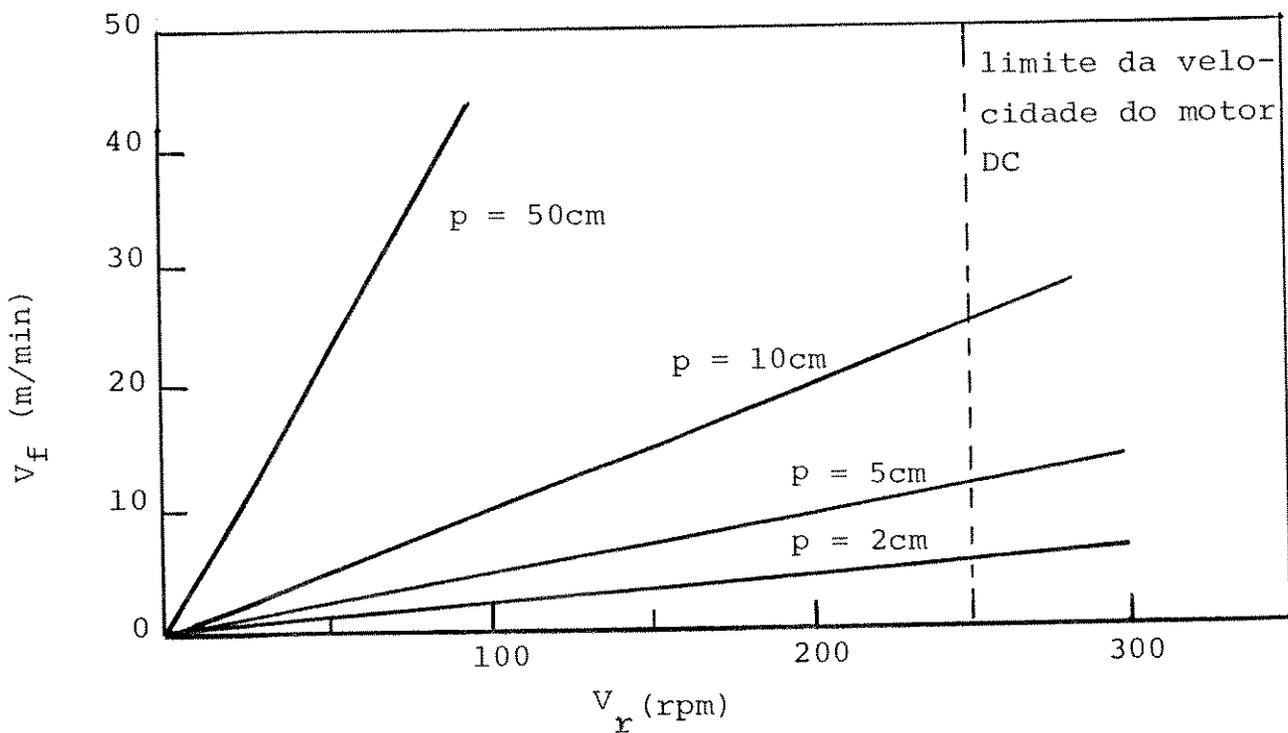


FIG. 4.11 - Relação entre a velocidade de puxamento da fibra V_f e a velocidade de rotação para alguns valores do passo de rotação p .

CAPÍTULO 5 - MODELAMENTO TEÓRICO DA FIBRA MONOMODO DE BAIXA BIRREFRINGÊNCIA POR ROTACÃO DA PREFORMA

5.1 - INTRODUÇÃO

Nesse capítulo será apresentada a formulação para o retardo (diferença de fase) devido à birrefringência em fibras ópticas monomodo fabricadas por rotação da preforma.

Para um maior entendimento do modelo procurou-se mostrar a influência no retardo a partir de placas birrefringentes sobrepostas, colocadas primeiramente com os eixos rápidos (ou lentos) ortogonais entre si, depois a 45° em relação à anterior, chegando-se no modelo teórico^[37] desenvolvido para este tipo de fibra.

Em seguida apresentam-se os resultados teóricos obtidos a partir dos valores de Birrefringência Modal estimados nas fibras fabricadas e dos passos de rotação utilizados.

5.2 - MODELO TEÓRICO

A fibra óptica monomodo, como um meio birrefringente, possui dois eixos principais ortogonais entre si que possuem diferentes índices de refração efetivo. Se chamarmos o eixo principal que possui índice de refração menor como eixo rápido, e aquele com índice de refração maior como eixo lento devido às suas velocidades de propagação, poderemos entender o que ocorre no processo de rotação da preforma. Pode-se imaginar que a fibra seja composta de elementos discretos de placas birrefringentes cujo eixo rápido (ou lento) vai girando ao longo do comprimento da fibra.

Observando-se primeiramente o caso de somente duas placas birrefringentes sobrepostas, com os eixos rápidos perpendiculares entre si, obtém-se um arranjo similar ao compensador de Soleil-Babinet^[27], cujo princípio é aqui descrito. Considere duas placas

de quartzo cristalino de espessuras iguais, de tal forma que sejam cortadas com o eixo óptico paralelo em relação à face da placa. Se estas placas forem montadas uma sobre a outra de tal forma que os eixos ópticos das placas fiquem perpendiculares entre si, o lançamento de uma luz linearmente polarizada incidindo normalmente na placa com o plano de vibração formando um ângulo θ em relação ao eixo óptico, será dividida em duas componentes sendo uma o raio ordinário O, e a outra o raio extraordinário E.

A componente E, paralela ao eixo óptico da primeira placa, propagará com uma velocidade menor do que a componente O até atingir a segunda placa. Neste ponto a componente E irá se tornar a componente O já que agora está perpendicular ao eixo óptico. Da mesma forma, neste ponto a componente O da primeira placa tornará a ser a componente E na segunda placa. Isto significa que as componentes trocarão de velocidades ao passar de uma placa para outra. Por causa dessa mudança nas velocidades e pelo fato das placas serem de espessuras iguais, qualquer diferença de fase (ou retardo) que possa ter acumulado na primeira placa é cancelada ao passar pela segunda.

Trocando uma das placas por outra de espessura variável como mostrado na Fig. 5.1, qualquer retardo pode ser obtido variando a espessura da placa móvel através de um parafuso micrométrico. A diferença de fase será dada por $\delta = 2\pi (n_o - n_e) (d_1 - d_2) / \lambda$ e este último arranjo corresponde ao compensador de Soleil-Babinet.

Para o caso da fibra óptica monomodo fabricada por rotação da preforma, a visualização dos elementos discretos e consecutivos de placas birrefringentes é mostrada na Fig. 5.2 onde podemos observar como ocorre a variação do retardo ao longo dos elementos discretos birrefringentes.

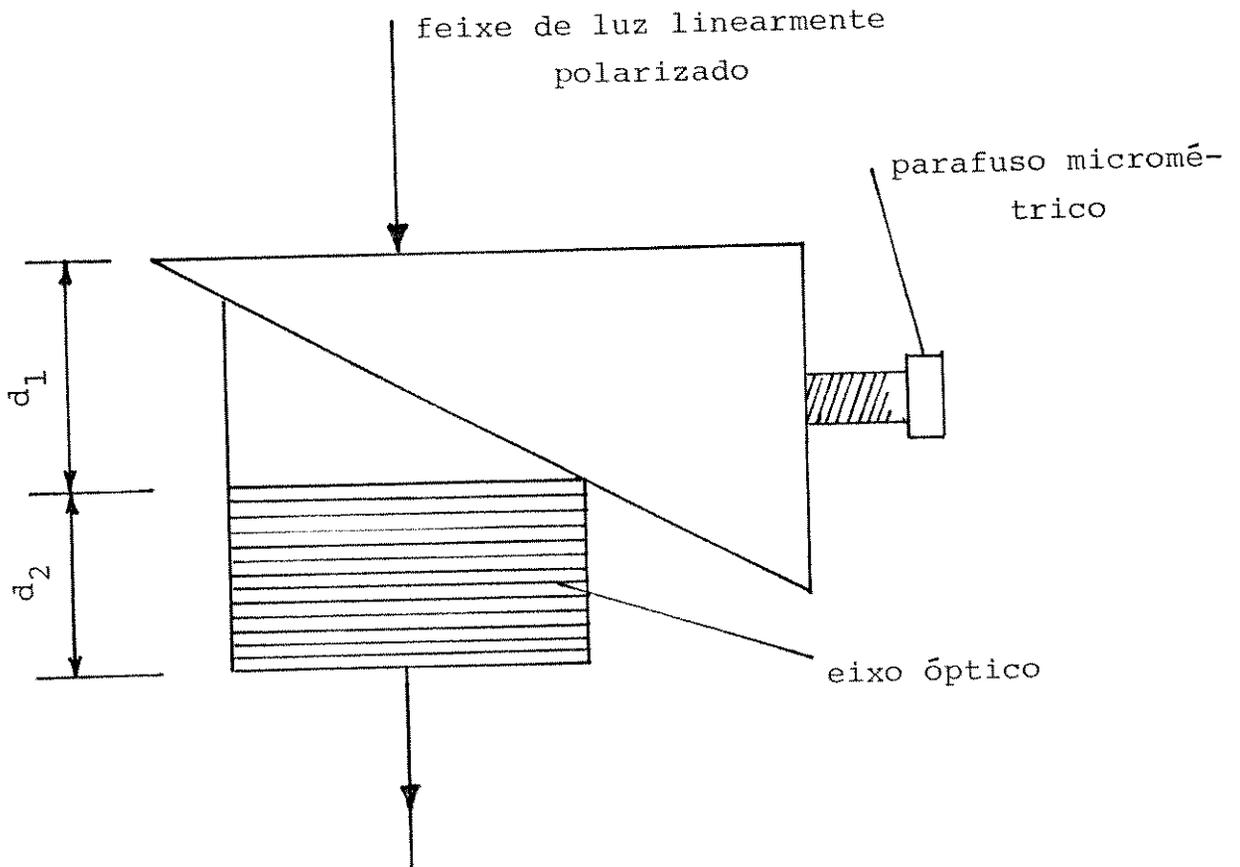


FIG. 5.1. - Compensador de Soleil-Babinet.

Nesta figura mostra-se um pedaço de fibra composto de cinco elementos birrefringentes cujo eixo rápido está sendo girado de 45° em relação ao elemento anterior.

Os pontos observados correspondem ao término de cada elemento e estão indicados por z_1, z_2, z_3, z_4 e z_5 . No lançamento, z_0 , uma luz linearmente polarizada é lançada a 45° em relação a um dos eixos principais da fibra (no caso o eixo rápido ou eixo tracejado). Nesta condição, são excitados os dois modos ortogonais E_x e E_y com a mesma amplitude, sendo que neste ponto o retardo é nulo.

A componente E_y propagar-se-á no eixo rápido (menor índice de refração) do elemento I e se adiantará em relação a E_x no ponto z_1 , como mostrado na Fig. 5.2.

Em II, as componentes já com um retardo, se propagarão entre os eixos rápido e lento e, portanto, num mesmo índice de refração médio, não sofrendo retardo além do já existente.

No elemento III a componente E_y irá se propagar pelo eixo lento, enquanto que a componente E_x estará se propagando pelo eixo rápido, compensando o retardo anteriormente sofrido. Já em IV, as componentes não sofrerão nenhum retardo pelo mesmo motivo de II. A partir de V o processo se repete.

Na parte inferior da Fig. 5.2 mostra-se o retardo em cada elemento e nota-se que no ponto z_4 a soma dos retardos nos elementos anteriores será nula.

Como visto anteriormente, em uma fibra óptica monomodo birrefringente o retardo cresce linearmente com o comprimento da fibra, enquanto neste caso o retardo é oscilatório em torno de um valor nulo, significando que as componentes E_y e E_x vão se alternando, ora passando no eixo rápido ora no lento, compensando o retardo

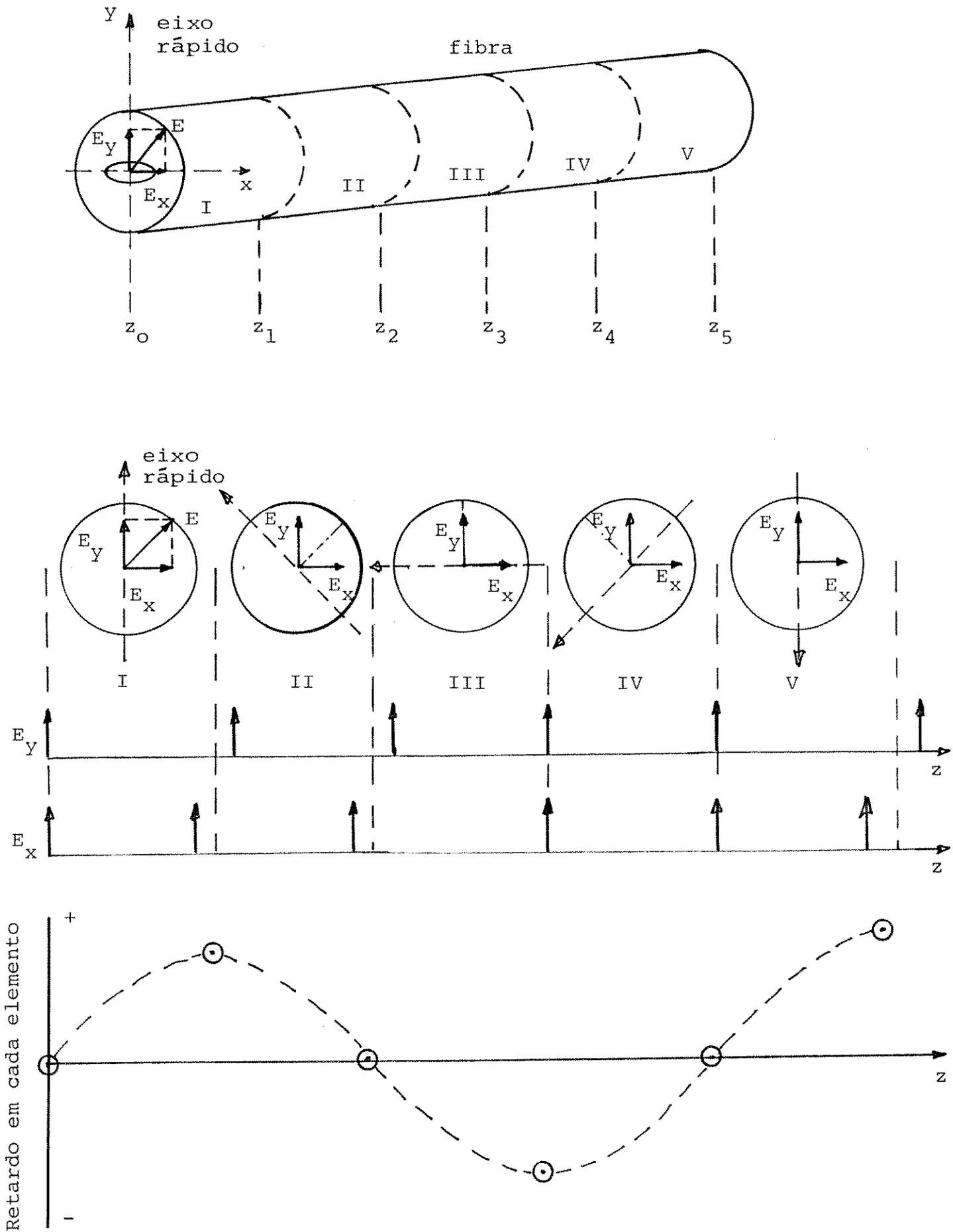


FIG. 5.2 - Observação do retardo nos elementos discretos birrefringentes.

sofrido no elemento anterior.

Uma expressão teórica ^[37] para este modelo é dada pela seguinte expressão para o retardo R em função do comprimento z da fibra

$$R(z) = 2 \operatorname{sen}^{-1} \left| \frac{\rho}{(1+\rho^2)^{1/2}} \operatorname{sen} \gamma z \right| \quad (5.1)$$

onde

$$\rho = \frac{\Delta\beta}{2(\xi - \alpha)} \quad (5.2)$$

$$\gamma = \frac{1}{2} \left| \Delta\beta^2 + 4(\xi - \alpha)^2 \right|^{1/2} \quad (5.3)$$

$\Delta\beta$ = diferença na constante de propagação dos dois modos ortogonais (rad/m)

ξ = taxa de rotação na fibra (rad/m)

α = rotação óptica (rad/m)

A rotação óptica α é introduzida pelo efeito fotoelástico no caso da fibra ser torcida depois do puxamento. No processo de fabricação da fibra de baixa birrefringência por rotação da preforma, poder-se-ia supor que fosse criada a rotação óptica. Isto não ocorre pois, durante o puxamento, o vidro está com viscosidade suficientemente baixa e não suporta tensão de cisalhamento ("shear") tendo como consequência o valor nulo para α .

Com isso a expressão para fibras fabricadas por rotação da preforma pode ser reescrita como:

$$R(z) = 2 \operatorname{sen}^{-1} \left\{ \frac{\Delta\beta}{(4\xi^2 + \Delta\beta^2)^{1/2}} \operatorname{sen} \left| \frac{1}{2} (\Delta\beta^2 + 4\xi^2)^{1/2} z \right| \right\} \quad (5.4)$$

O passo de rotação p está relacionado com a taxa de rotação na fibra por

$$p = \frac{2\pi}{\xi} \quad (5.5)$$

Portanto para uma taxa de rotação de $7200^\circ/\text{m}$ o passo de rotação é igual a 5cm.

Usando a Birrefringência Modal, $B = \Delta\beta\lambda/2\pi$, foram realizados os cálculos teóricos para os valores do retardo em função do comprimento da fibra para alguns valores de p e B no comprimento de onda $\lambda = 633\text{nm}$, cujos resultados são apresentados nas Figs. 5.3, 5.4 e 5.5.

Na Fig. 5.3 apresentam-se os valores de retardo calculados ao longo de uma fibra de 10 metros de comprimento com Birrefringência Modal igual a $3,0 \times 10^{-8}$ correspondendo a um $\Delta\beta = 17,06^\circ/\text{m}$.

Para $p = 10\text{km}$, que corresponderia a uma fibra feita por puxamento normal (sem girar a preforma), o valor de retardo aqui encontrado (de 170°) é igual ao valor calculado usando a expressão de retardo $\delta = \Delta\beta L$. Diminuindo o passo de rotação para $p = 10\text{m}$ o valor de retardo já se torna oscilatório com um máximo de $26,7^\circ$.

Quando $p = 5\text{cm}$, o qual foi utilizado no processo de fabricação das fibras aqui obtidas, o retardo torna-se desprezível ao longo de toda a fibra.

Como o comprimento das fibras a serem medidas seria de pedaços em torno de 1 metro, a Fig. 5.4 mostra o gráfico anterior expandido nessa região, onde vemos pequenas oscilações em torno do valor nulo de retardo.

Na Fig. 5.5 o valor de B é aumentado para $3,0 \times 10^{-7}$; utilizando a mesma taxa de rotação vemos que a amplitude do retardo também aumenta. Isto significa que para se obter uma fibra com baixa birrefringência ao longo de toda a fibra, a birrefringência intrínseca não pode ficar em níveis elevados ou então a taxa de rotação deve ser muito alta para se obter uma melhor compensação.

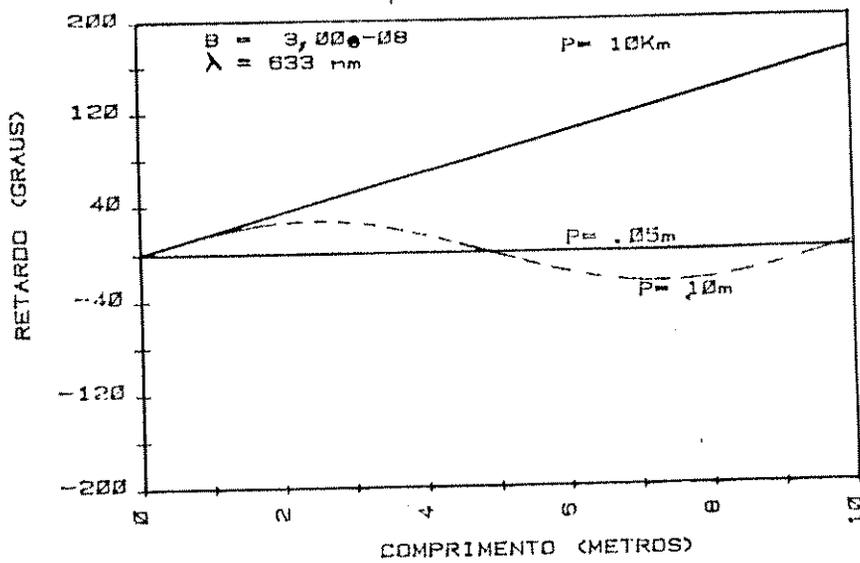


FIG. 5.3 - Variação do retardo ao longo do comprimento da fibra com $B = 3,0 \times 10^{-8}$ em função do passo de rotação.

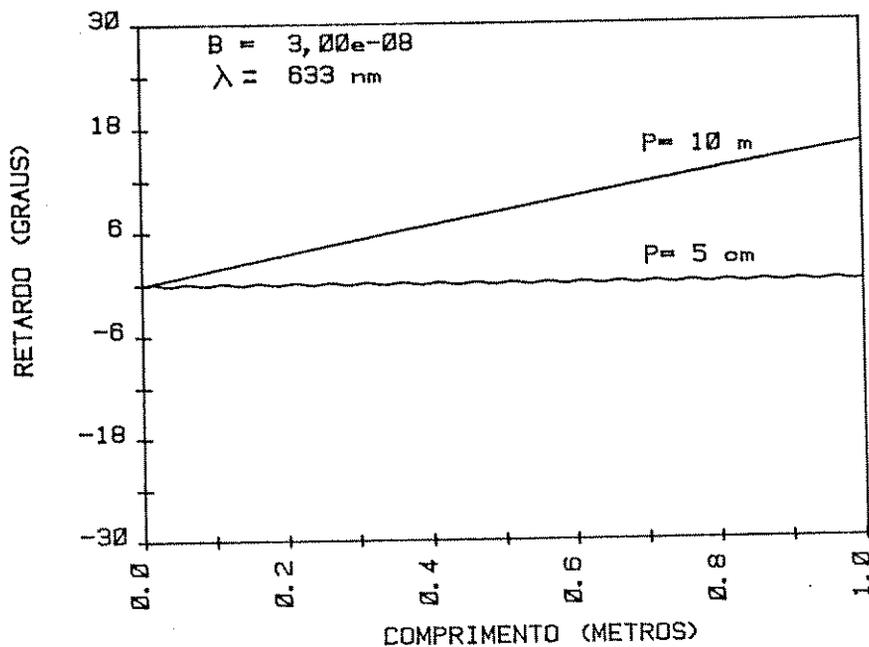


FIG. 5.4 - Variação do retardo em 1 metro de fibra com $B = 3,0 \times 10^{-8}$ em função do passo de rotação.

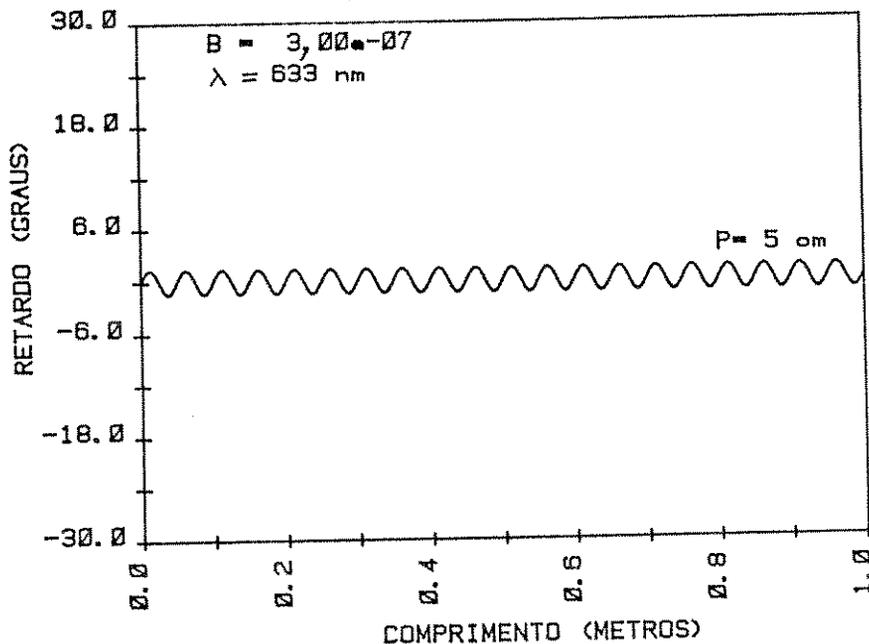


FIG. 5.5 - Variação do retardo em 1 metro de fibra com $B = 3,0 \times 10^{-7}$ para um passo de rotação igual a 5 cm.

CAPÍTULO 6 - CARACTERIZAÇÃO DAS FIBRAS OBTIDAS POR ROTAÇÃO DA PREFORMA

6.1. - INTRODUÇÃO

O processo de fabricação de fibras com alta ou baixa birrefringência, visando a um aumento da capacidade de transmissão de sinais através delas, será mais eficaz se o controle da birrefringência não afetar alguns parâmetros importantes dessas fibras, principalmente a atenuação. Neste capítulo, apresentam-se os resultados obtidos na caracterização das fibras ópticas monomodo de baixa birrefringência fabricadas durante este trabalho.

A manutenção da uniformidade nas dimensões geométricas da fibra óptica é de grande importância para minimizar as perdas quando da emenda das fibras em um enlace óptico, como também da sua utilização em conectores não ajustáveis. Flutuações no raio do núcleo, causada por variações nas velocidades de puxamento ou de alimentação da preforma, assim como vibrações mecânicas, introduzem um aumento na atenuação da fibra; além disso, flutuações térmicas resultantes da variação do fluxo de gás de argônio no forno de grafite também contribuem para a não uniformidade do diâmetro da fibra [33].

O processo utilizado para a fabricação de fibras de baixa birrefringência introduz um movimento de rotação na preforma e, como consequência, pode causar vibrações mecânicas e turbulências na região de afinilamento da preforma criando modificações geométricas, como variação de diâmetro e elipsidade da fibra.

Portanto, para poder melhor avaliar essas possíveis influências, as fibras obtidas foram caracterizadas quanto às dimensões geométricas e de atenuação, sendo aqui utilizado o método de "cutback" [4], para a medida da atenuação espectral.

Apresentam-se também neste capítulo os resultados obtidos na medida do comprimento de onda de corte realizados nas fibras fabricadas por rotação da preforma e que, de agora em diante, serão denominadas por M-XXX-RP para diferenciar da região da mesma preforma puxada em condições normais, isto é, sem a rotação da preforma e denominadas de M-XXX-NO.

Para a medida da birrefringência nas fibras, com e sem rotação da preforma, foi feita uma montagem óptica para evitar a introdução de birrefringência devido a efeitos externos como curvatura, pressão e torção. Os resultados obtidos são também apresentados.

6.2. - CARACTERIZAÇÃO GEOMÉTRICA

As fibras monomodo de baixa birrefringência, obtidas pelo método de rotação da preforma, foram caracterizadas qualitativamente quanto às suas propriedades geométricas.

Para isso foi utilizado um microscópio óptico invertido com uma objetiva de 40 x, no qual pedaços de fibra da região que sofreu rotação eram medidos e fotografados. O revestimento primário de acrilato era removido para assegurar um maior contraste na casca. As fibras foram iluminadas por transmissão e as fotografias obtidas são mostradas na Figura 6.1., onde a região escura em torno do núcleo corresponde à região da casca depositada de $F-P_2O_5-SiO_2$, que possui índice de refração levemente menor que a casca de SiO_2 . Pode-se notar a simetria circular tanto da casca quanto do núcleo nas fibras

obtidas.

Na Tabela 6.1, as características geométricas dessas fibras são apresentadas.

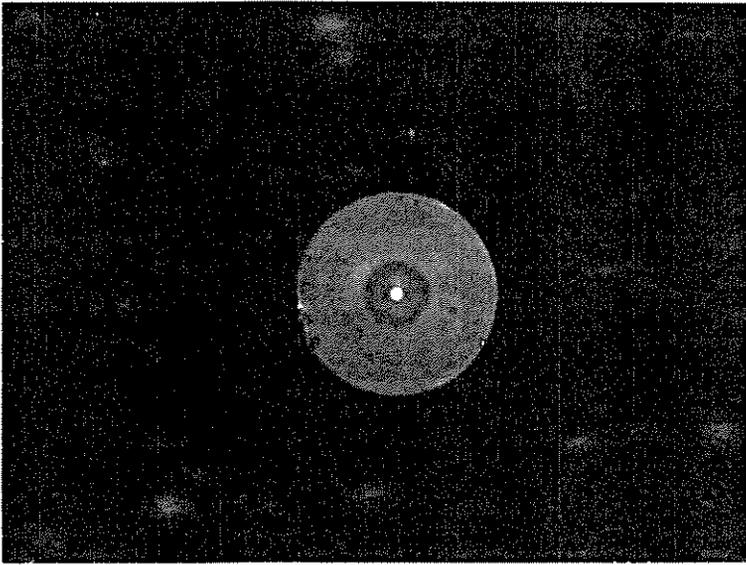
Tabela 6.1. - Dimensões geométricas das fibras obtidas por rotação da preforma.

Fibra	Diâmetro da casca (μm)	Diâmetro do núcleo (μm)
M-784-RP	92	4,8
M-785-RP	124	6,0
M-788-RP	110	6,0
M-789-RP	110	6,0
M-492-RP	107	5,8
M-793-RP	137	7,0

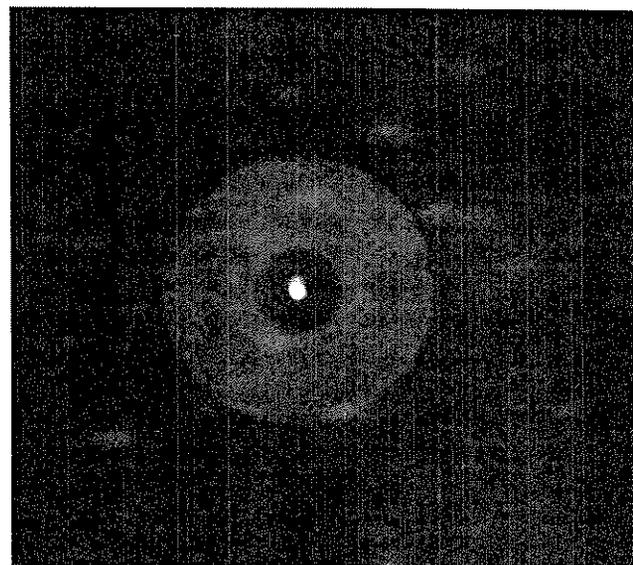
As fibras foram puxadas com diâmetros de casca diferentes de forma a conseguir comprimentos de onda de corte menores que $0,6\mu\text{m}$, já que as diferenças de índices de refração Δn não eram os mesmos para as fibras, como mostrado na Tabela 4.1.

As fotografias da figura 6.1, representam apenas uma dentre várias observações realizadas nas características geométricas feitas em pedaços das extremidades inicial e final das fibras obtidas. O diâmetro e a circularidade da casca e do núcleo se apresentaram constantes nos pedaços observados de uma mesma fibra. Para poder melhor avaliar qualquer variação prejudicial ao longo da fibra as medidas de atenuação foram realizadas.

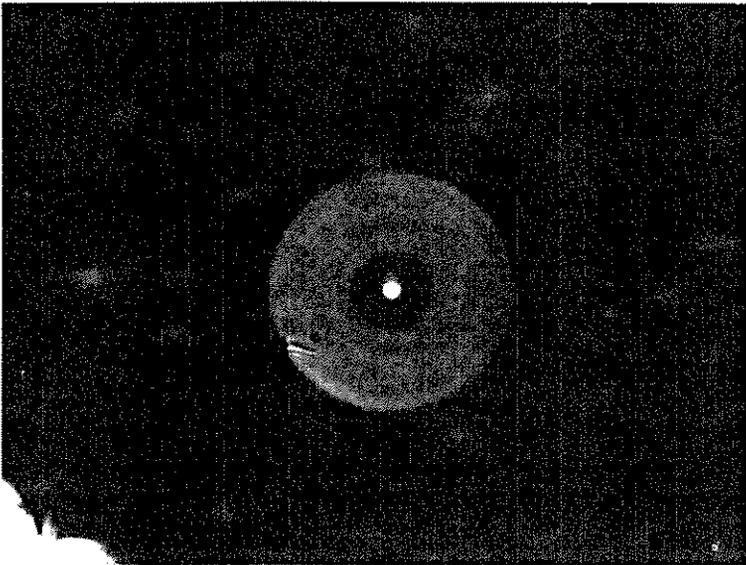
M-784



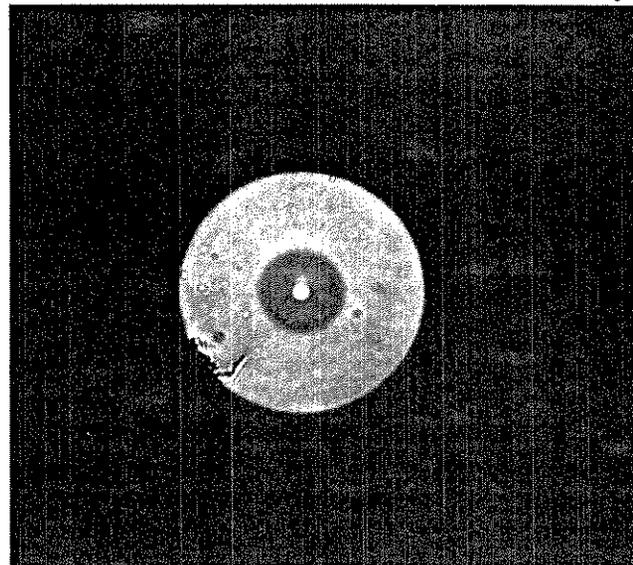
M-785



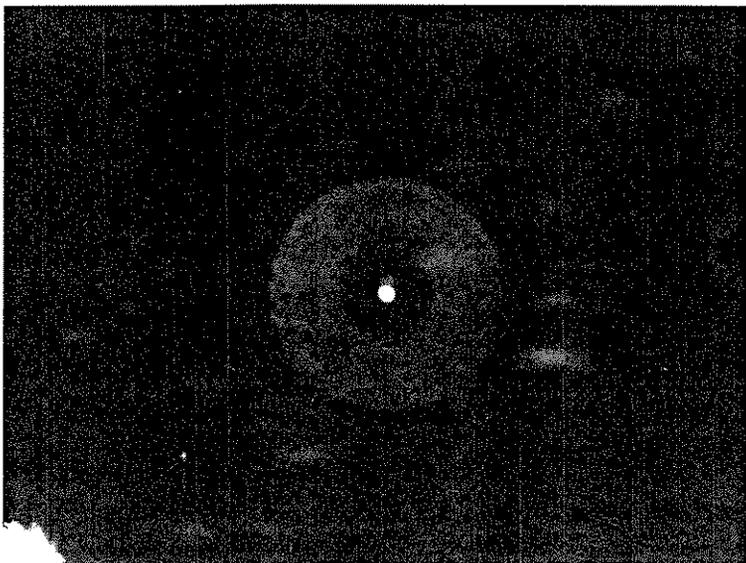
M-788



M-789



M-792



M-793



FIG. 6.1 - Fotografias da secção transversal das fibras obtidas por rotação da preforma.

6.3. - MEDIDAS DE ATENUAÇÃO E DO COMPRIMENTO DE ONDA DE CORTE

A atenuação em fibras ópticas é um dos parâmetros mais importantes em sua caracterização, já que a atenuação limitará a distância máxima entre repetidores, principalmente em fibras mono modo.

A atenuação α , expressa em dB/km [37], é dada por:

$$\alpha = 10 \log(P_i/P_s)/L \quad (6.1)$$

onde

P_i = potência óptica de entrada
 P_s = potência óptica de saída
 L = comprimento da fibra (km).

A região de 0,6 μ m a 1,6 μ m, na qual operam os sistemas de comunicações por fibra óptica, possui atenuação devida à contribuição de vários mecanismos e pode ser expressa por:

$$\alpha(\lambda) = A/\lambda^4 + B + C(\lambda) \quad (6.2)$$

onde

A = coeficiente de espalhamento Rayleigh
 B = perda devido às imperfeições no guia de onda
 $C(\lambda)$ = perda devido às impurezas.

Como visto anteriormente, no processo de rotação da preforma durante o puxamento, poderia-se introduzir modificações geométricas no guia de onda, e dessa forma contribuir para um aumento na atenuação da fibra, sendo, portanto, a medida da atenuação uma forma de verificar se houve alguma irregularidade durante este processo.

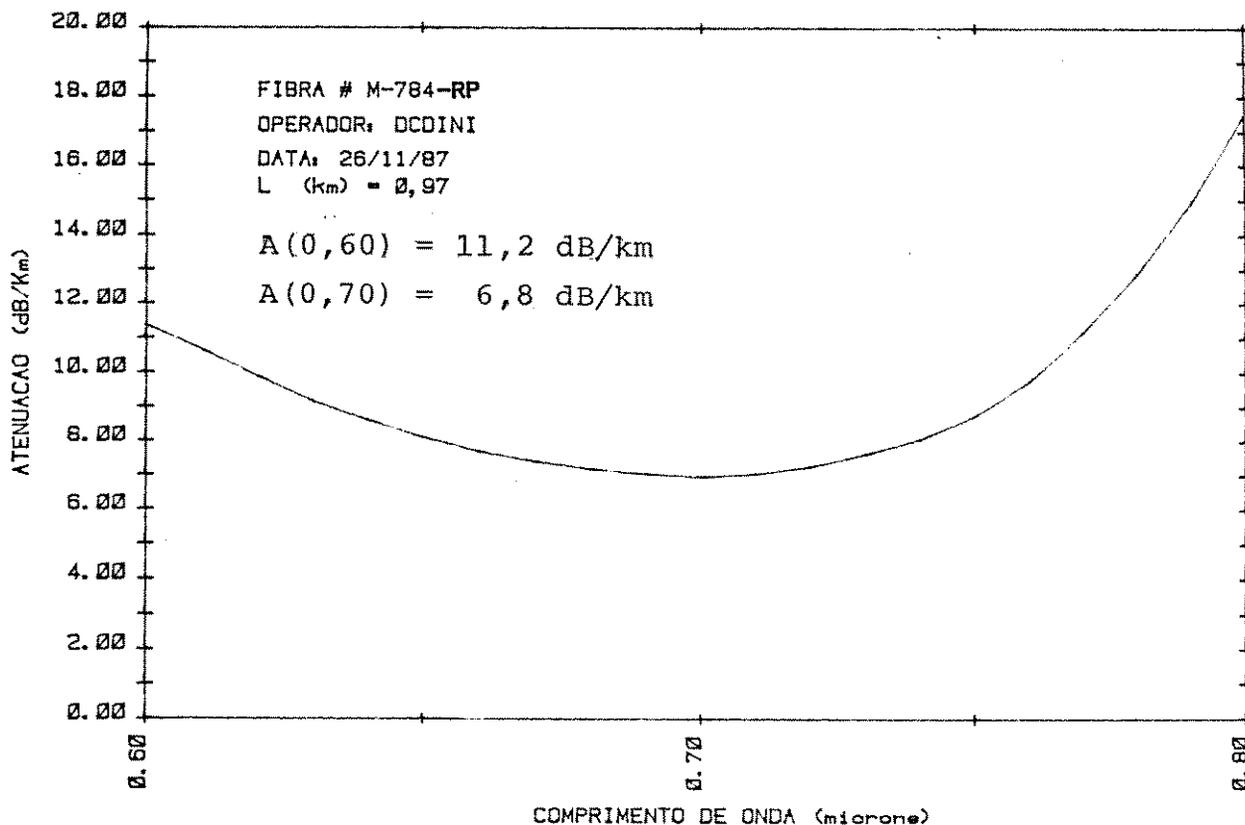
O método utilizado para medir a atenuação óptica nas fibras foi o "cutback", cuja montagem utilizada já foi descrita na Seção 2.3, quando da medida do comprimento de onda de corte, na fibra de casca elíptica.

Na medida da atenuação é feita primeiro a aquisição da potência óptica transmitida na fibra inteira em função do comprimento de onda ($P_1(\lambda)$) dentro do intervalo espectral a ser medido; depois a fibra é cortada deixando os 10 metros iniciais, sem mudar as condições de lançamento, e nova aquisição é feita no mesmo intervalo ($P_2(\lambda)$).

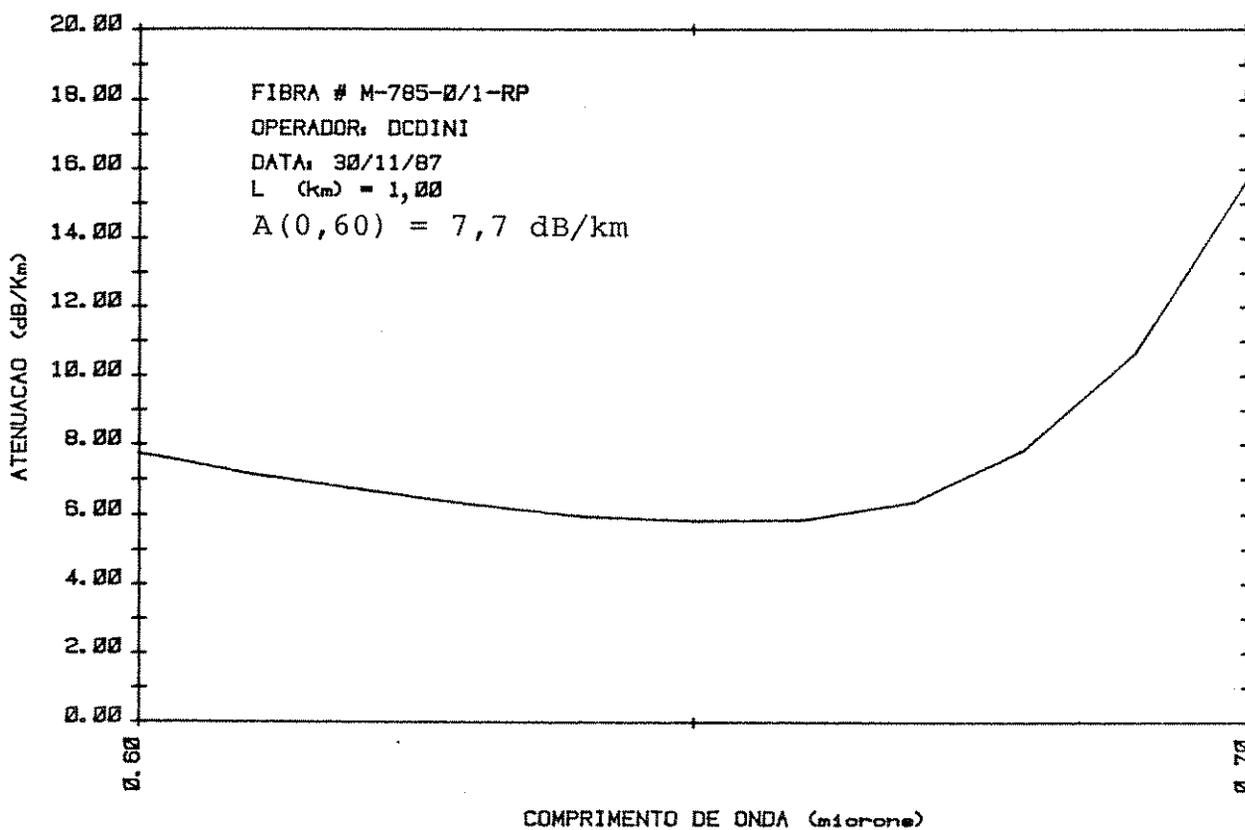
O coeficiente de espalhamento Rayleigh nas fibras monomodo dopados com GeO_2 e com Δn de $3,0 \times 10^{-3}$ é de $0,95 \mu\text{m}^4 \text{ dB/km}$ [4] que corresponde, em $\lambda = 0,6 \mu\text{m}$ e $\lambda = 0,7 \mu\text{m}$, a uma atenuação de $7,33 \text{ dB/km}$ e $3,96 \text{ dB/km}$, respectivamente, sendo que esses valores correspondem aos menores valores possíveis de atenuação a serem obtidos nessas fibras.

Os resultados de atenuação das fibras obtidas são mostrados nas Figs. 6.2 e 6.3 e serão discutidos a seguir. A fibra M-784-RP (Rotação da preforma), mostrada na Fig. 6.2(a), foi medida no intervalo de $0,6$ a $0,8 \mu\text{m}$. O comprimento da fibra utilizado foi de $0,97 \text{ km}$, e correspondia à soma dos três segmentos de $0,24 \text{ km}$ em que foram feitas mudanças tanto na velocidade de puxamento quanto na velocidade de rotação da preforma, durante o puxamento dessa fibra.

Os valores de atenuação de $A(0,60 \mu\text{m}) = 11,2 \text{ dB/km}$ e $A(0,70 \mu\text{m}) = 6,8 \text{ dB/km}$ estão acima dos esperados, isto pode ser creditado às regiões onde ocorreram alterações nas velocidades de puxamento de preforma fazendo com que o diâmetro da fibra sofresse alterações. Uma forma de confirmar essa hipótese seria medir a atenuação pelo OTDR e com isso visualizar a perda nas regiões de transição das velocidades. Devido ao aumento da atenuação a partir de $0,7 \mu\text{m}$, causado por radiação do modo fundamental LP_{01} , é impraticável a medida com o OTDR (monomodo) em $1,3 \mu\text{m}$, e mesmo com a utilização do



a) Fibra M-784-RP



b) Fibra M-785-RP

FIG. 6.2 - Atenuação em função do comprimento de onda nas fibras obtidas por rotação da preforma (RP).

OTDR (multimodo) em $0,85 \mu\text{m}$, já que neste último a perda da potência óptica entre a fibra multimodo, usada como lançamento, e a fibra monomodo, é grande devido a diferença de diâmetro dos núcleos de $50\mu\text{m}$ na multimodo para $8\mu\text{m}$ na monomodo.

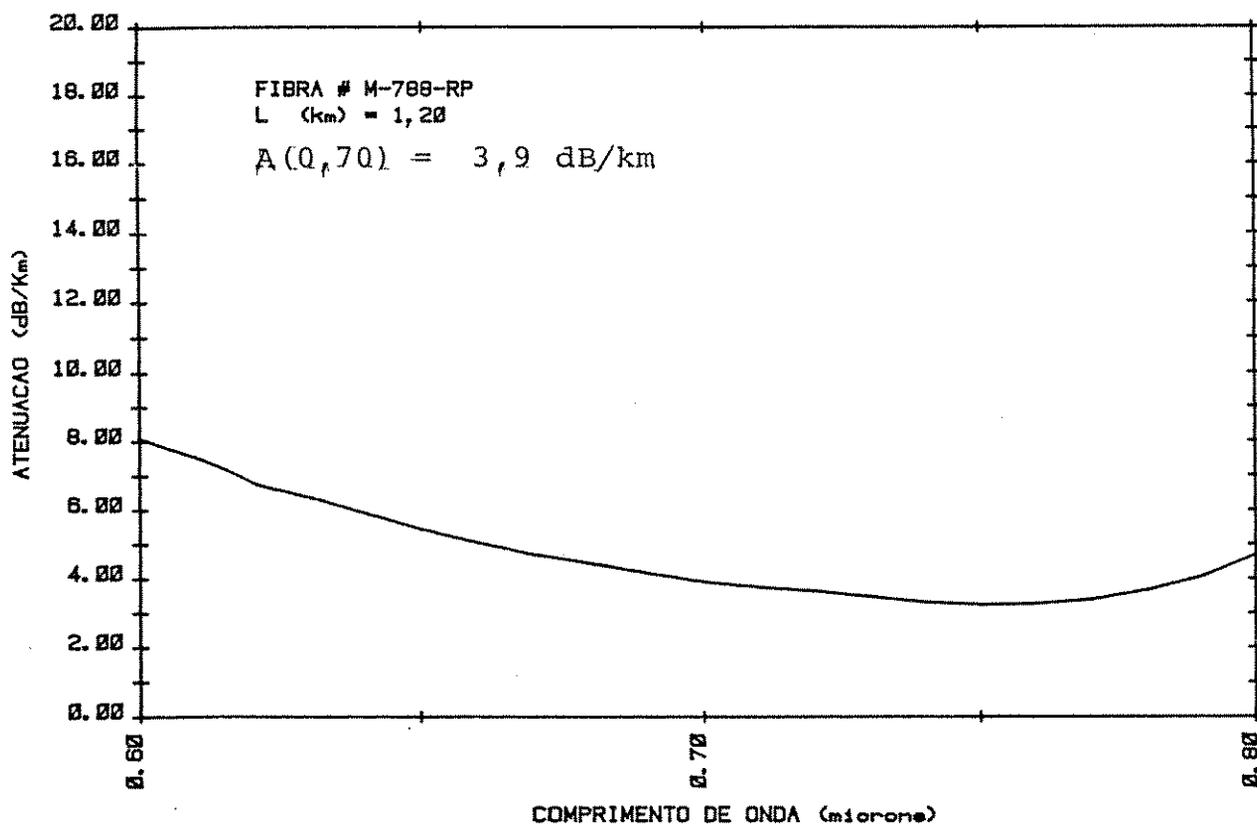
Já a fibra M-785-RP, de $1,0 \text{ km}$ de comprimento, em que as condições de puxamento se mantiveram constantes ao longo de todo o processo, foi medida na região de $0,6$ a $0,7\mu\text{m}$ e o valor de atenuação aqui obtido de $7,7 \text{ dB/km}$ em $0,6\mu\text{m}$ está próximo do valor esperado, significando que o processo de rotação da preforma não introduziu perdas adicionais na fibra.

O mesmo pode ser visto nas fibras M-788-RP e M-792-RP (Fig. 6.3) que tiveram $A(0,70) = 3,9 \text{ dB/km}$ e $A(0,70) = 4,0 \text{ dB/km}$, respectivamente, e portanto, próximo do valor calculado teoricamente de $3,96 \text{ dB/km}$. Nessas duas fibras o valor de atenuação em $0,6\mu\text{m}$ está maior do que o esperado devido à influência da atenuação do modo LP_{11} que tem dependência com o comprimento da fibra [4].

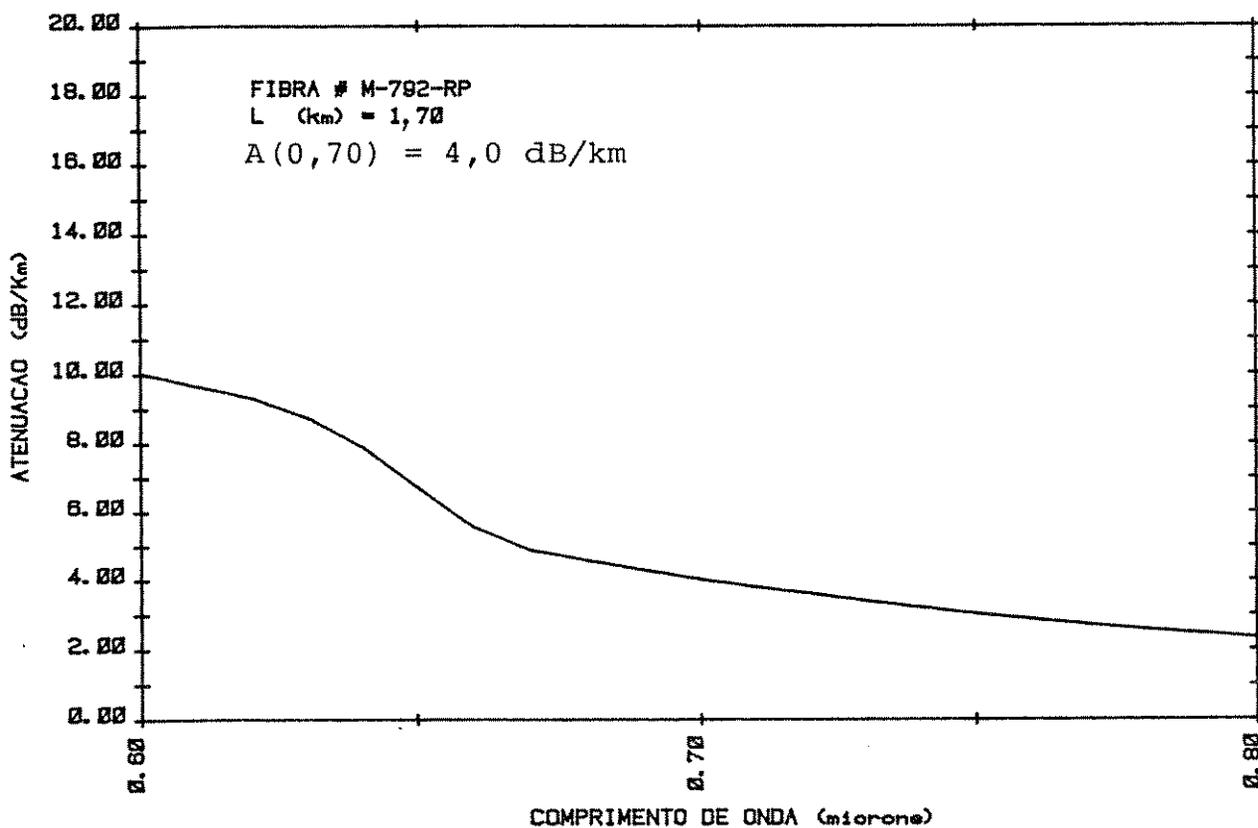
A fibra M-789-RP, de $2,5 \text{ km}$ de comprimento, foi medida por este método somente no comprimento de onda de $0,63 \mu\text{m}$ e o valor obtido foi de $7,93 \text{ dB/km}$.

As fibras M-784, M-785, M-788, M-789 e M-792 foram puxadas para se obter um comprimento de onda de corte, λ_c , em torno de $0,6 \mu\text{m}$.

Nestas condições não foi possível utilizar o método de medida de atenuação pela técnica de OTDR (Optical Time Domain Reflectometry) [4], já que estas fibras não suportam o guiamento em $\lambda = 1,28 \mu\text{m}$ onde o equipamento disponível opera. Este método permite ter uma "visualização" interna da atenuação ao longo de toda a



a) Fibra M-788-RP



b) Fibra M-792-RP

FIG. 6.3 - Atenuação em função do comprimento de onda nas fibras obtidas por rotação da preforma (RP).

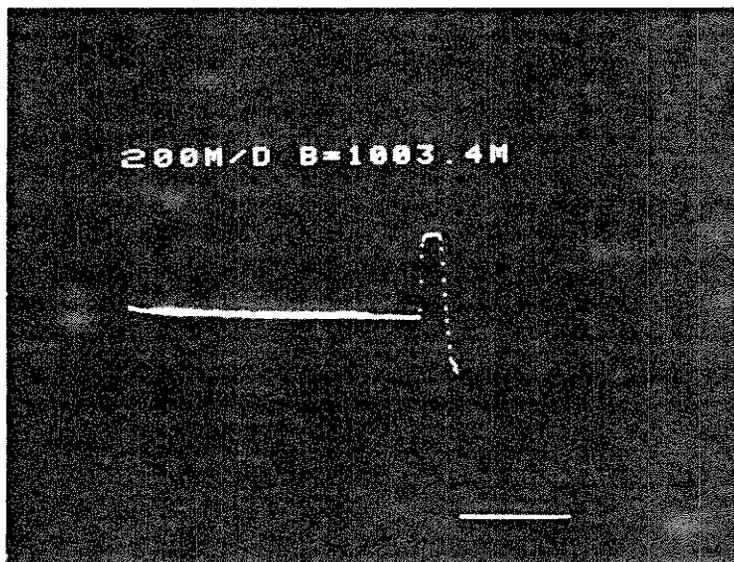
fibra, e assim permite observar a existência ou não de defeitos localizados que aumentam a atenuação da fibra, e que não podem ser detectados pelo método do "cutback".

Para isso foi feita a fibra M-793-RP com $\lambda_c = 1,0 \mu\text{m}$, a ser utilizada para a medida de birrefringência em $1,3 \mu\text{m}$ quando da obtenção dos componentes ópticos nesse comprimento de onda. Com ela foi possível medir a atenuação pelo OTDR, e cujo resultado é apresentado na Fig. 6.4, podendo-se notar que a atenuação se manteve homogênea ao longo da fibra. A atenuação de $0,62 \text{ dB/km}$ em $\lambda = 1,28 \mu\text{m}$ corresponde ao valor médio normalmente obtido nessas fibras, feitas por puxamento normal.

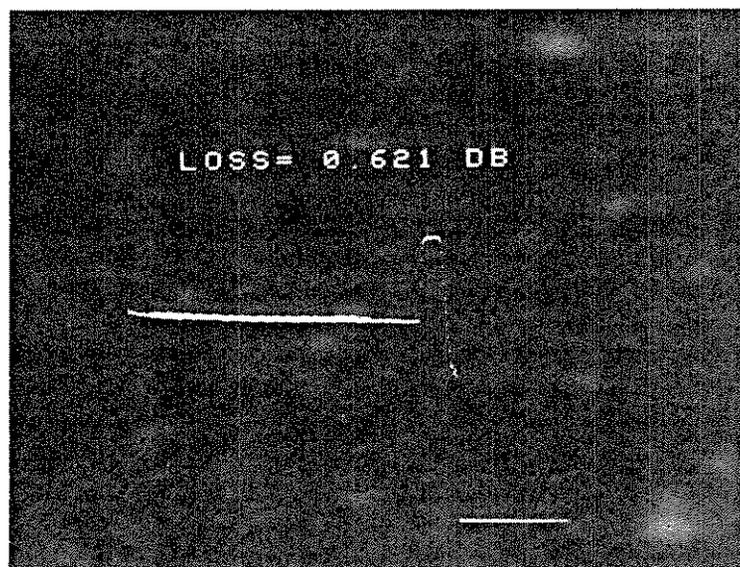
Na Tabela 6.2 é mostrado um resumo dos valores de atenuação obtidos nas fibras feitas por rotação da preforma, onde a primeira linha corresponde ao valor estimado teoricamente para atenuação devido somente ao espalhamento Rayleigh. A coluna p (cm) corresponde ao passo de rotação utilizado nas fibras.

Tabela 6.2 - Valores de atenuação obtidos nas fibras por rotação da preforma

Fibra	L (km)	p (cm)	A (0,60) dB/km	A (0,633) dB/km	A (0,70) dB/km
Atenuação mínima (Teórico)	-	-	7,3	5,9	4,0
M-784-RP	0,97	-	11,2	8,9	6,8
M-785-RP	1,0	5,16	7,7	6,2	-
M-788-RP	1,2	2,15	-	6,2	3,9
M-789-RP	2,5	5,0	-	7,9	-
M-792-RP	1,7	5,0	-	-	4,0
M-793-RP	1,6	5,0	A (1,28) = 0,62 dB/km		



a) Comprimento de fibra utilizado para a medida de atenuação no OTDR.



b) Atenuação na fibra M-793-RP com comprimento de 1003,4 m.

FIG. 6.4 - Fotografia da medida de atenuação pelo OTDR na fibra M-793-

Exceto a fibra M-784, que sofreu mudanças nas velocidades durante o puxamento, as outras fibras apresentam valores de atenuação próximos aos valores estimados teoricamente e aos valores normalmente obtidos em fibras monomodo atualmente utilizadas em telecomunicações. Portanto, o método utilizado de fabricação de fibras monomodo de baixa birrefringência por rotação da preforma não introduziu acréscimo na atenuação da fibra bem como alterações nas suas características geométricas.

- Medida do Comprimento de Onda de Corte

O conhecimento do valor efetivo do comprimento de onda de corte nas fibras obtidas é de grande importância na caracterização do retardo entre os dois modos ortogonalmente polarizados do modo fundamental HE_{11} , e, como consequência, no valor a ser obtido para a birrefringência. Caso a fibra esteja com mais de um modo (LP_{01} e LP_{11}) no comprimento de onda a ser medido, o valor do grau de polarização na saída da fibra não dependerá exclusivamente da diferença de fase entre os modos ortogonais HE_x e HE_y , mas também da interferência entre esses modos e o LP_{11} que possui outra constante de propagação de fase.

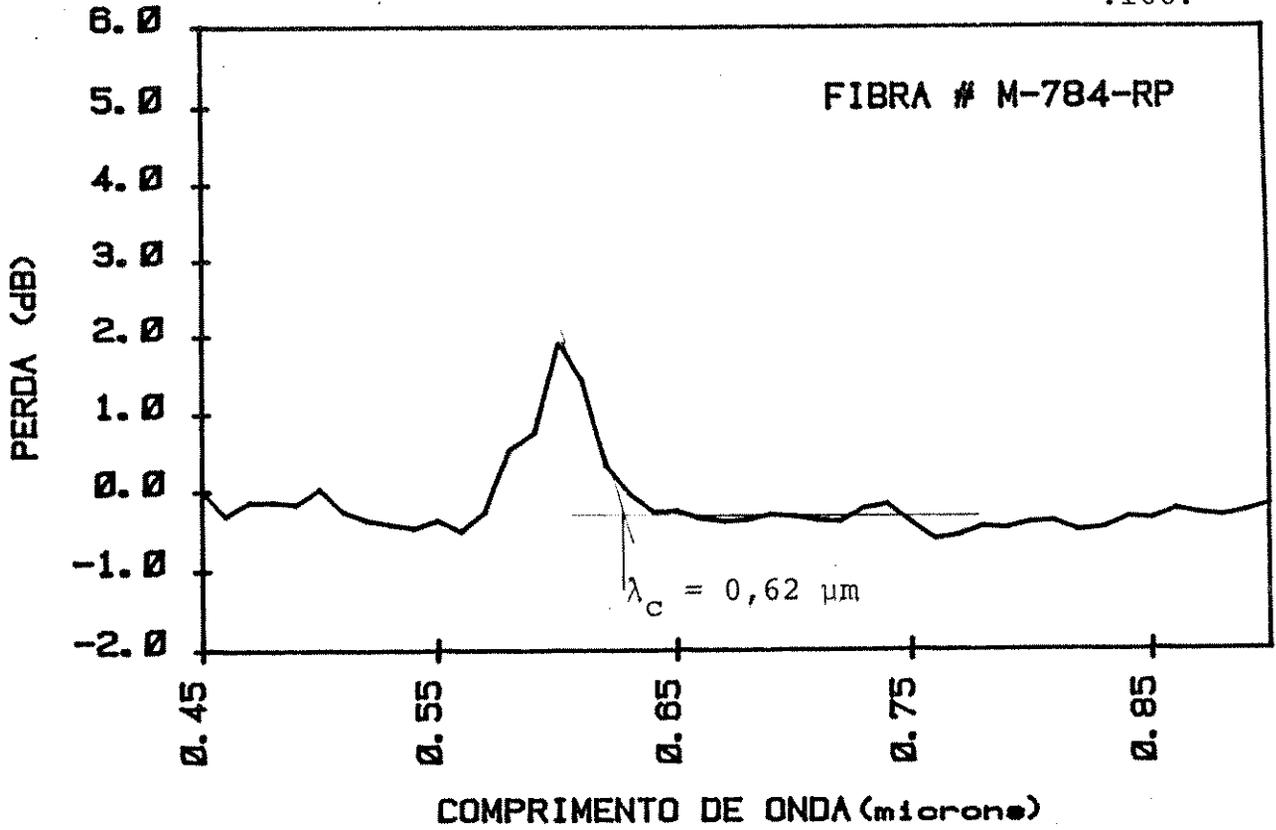
A montagem utilizada foi descrita na Seção 2.3. Como o retardo foi medido em um pedaço de fibra de aproximadamente 1 metro de comprimento e com a fibra reta, isto é, com raio infinito, foi usada esta condição na medida do comprimento de onda de corte. O procedimento para a realização desta medida já foi também descrito na Seção 2.3., sendo que o raio de curvatura inserido na fibra durante a aquisição da segunda medida foi de 7 cm.

Os gráficos obtidos são mostrados nas Figs. 6.5, 6.6 e 6.7 correspondendo a medidas na região de 0,45 μm a 0,85 μm , excepto para a fibra M-793-RP, feita entre 0,70 μm e 1,15 μm . Os valores do comprimento de onda de corte λ_c , são também mostrados nessas figuras. Pelos resultados vemos que somente as fibras M-784-RP, M-785-RP e M-788-RP possuem $\lambda_c < 0,633 \text{ nm}$ e foram as únicas caracterizadas quanto à birrefringência.

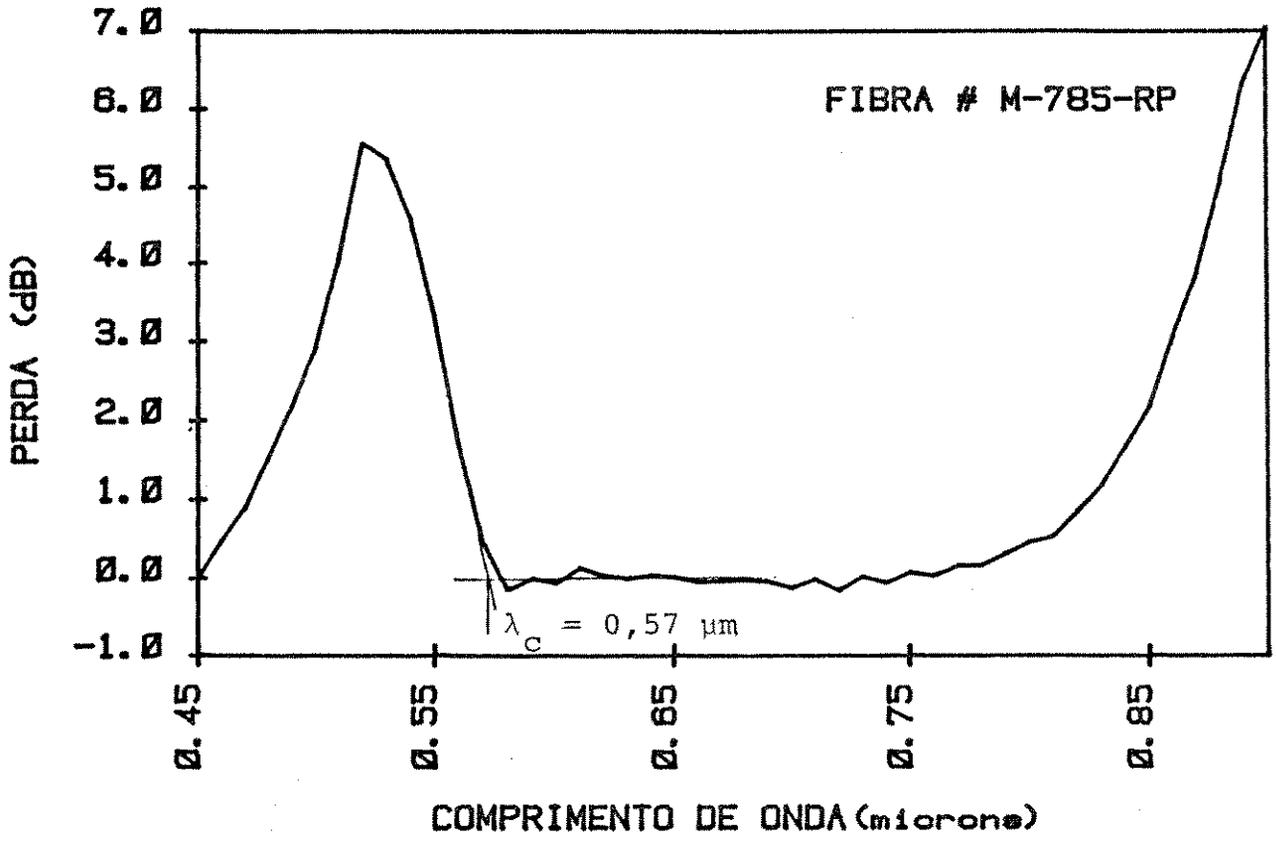
Essa variação do valor efetivo de λ_c em relação ao estimado a partir do perfil de índice de refração da preforma, se deve a flutuações na diferença de índice de refração ou no diâmetro do núcleo ao longo da preforma. A medida do perfil de índice de refração foi realizada em uma região no meio da preforma enquanto que a medida do comprimento de onda de corte foi feita em uma das extremidades da fibra, que corresponde às extremidades da preforma.

6.4 - MEDIDA DA BIRREFRINGÊNCIA

Para a medida da birrefringência nas fibras obtidas, procurou-se eliminar efeitos de curvaturas, pressão e torção através de uma montagem especial construída durante este trabalho e cuja descrição esquemática está mostrada na Fig. 6.8. Para isso utilizou-se de um banco óptico da Oriel de 2,0 metros de comprimento no qual os posicionadores XYZ e os componentes ópticos foram colocados. Com a montagem na vertical do banco óptico evita-se a birrefringência induzida por curvatura e torção inerentes em uma montagem na horizontal. Quanto à fonte óptica, fez-se com

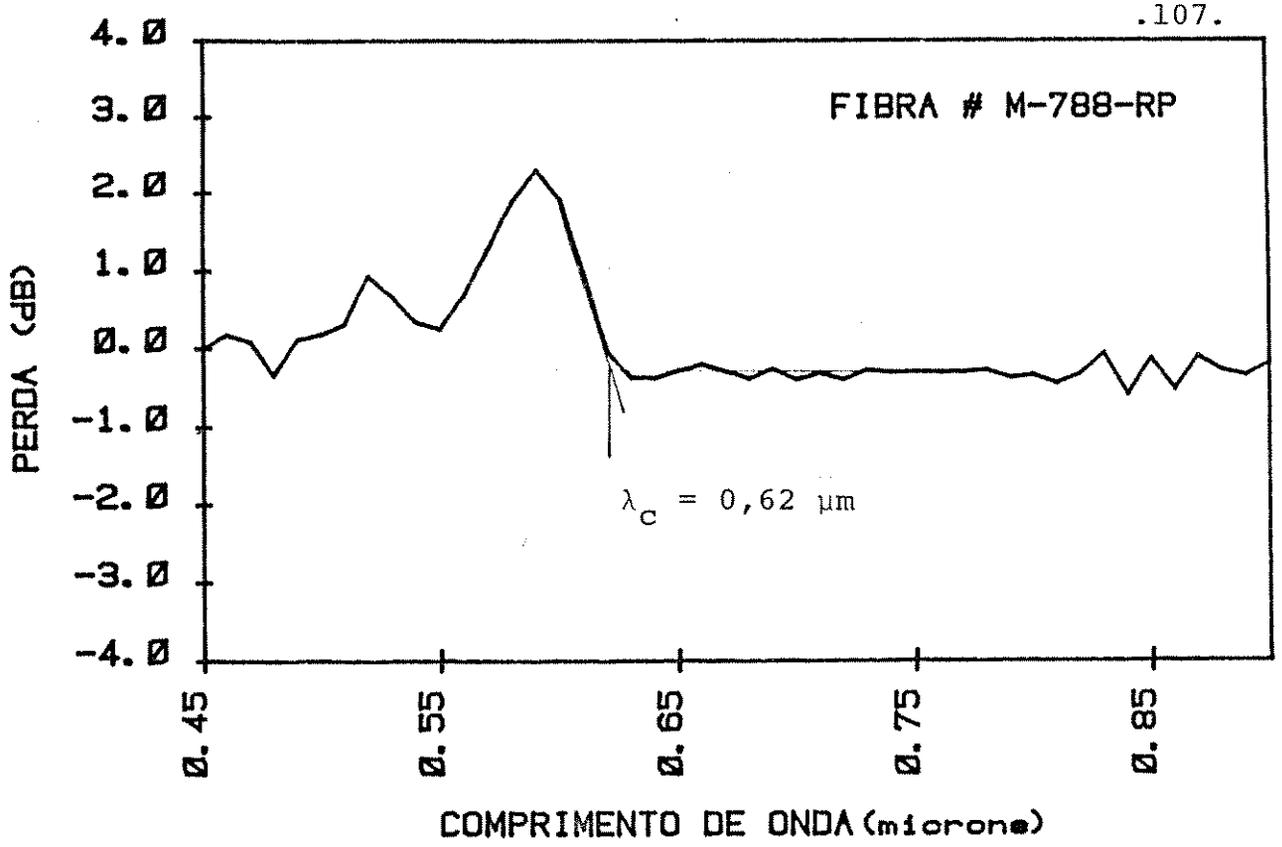


a) Fibra M-784-RP

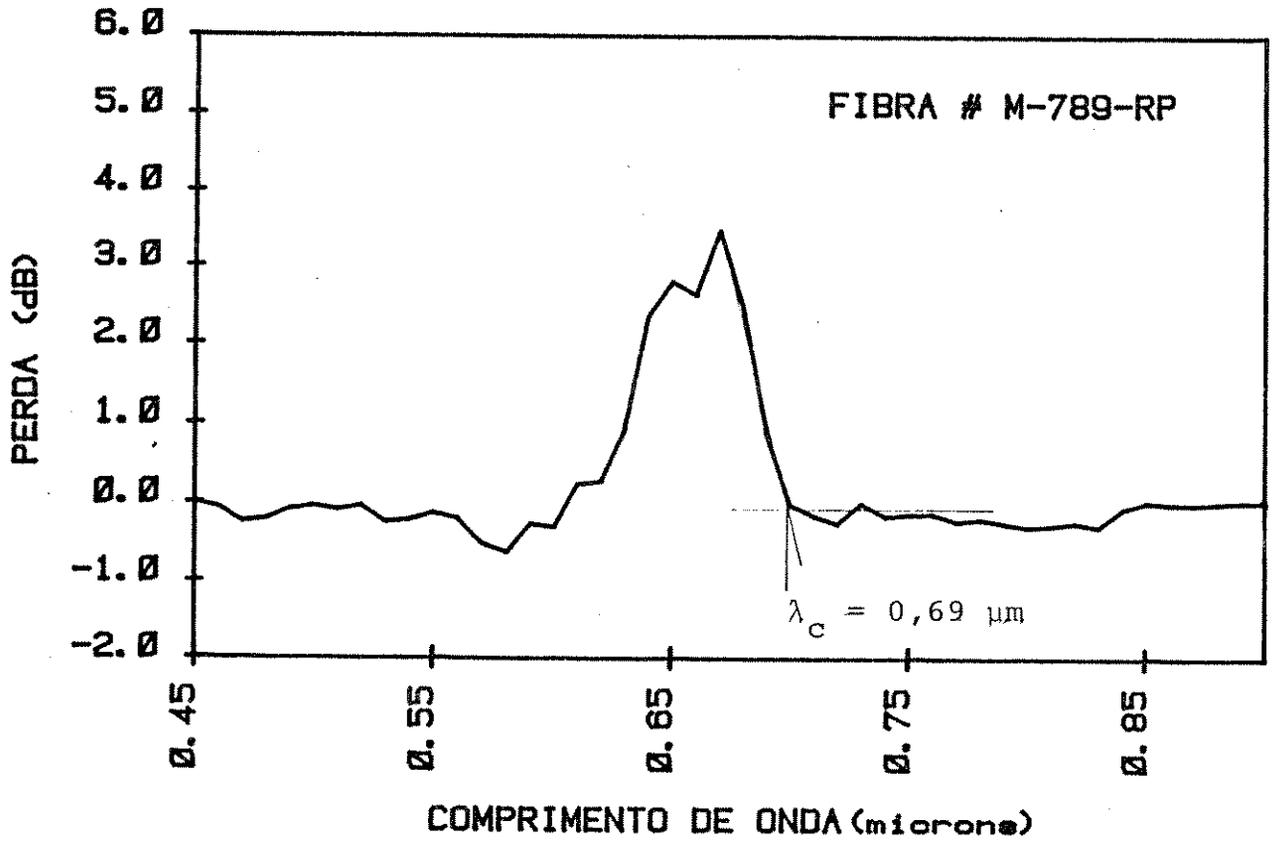


b) Fibra M-785-RP

FIG. 6.5 - Comprimento de onda de corte do modo LP₁₁.

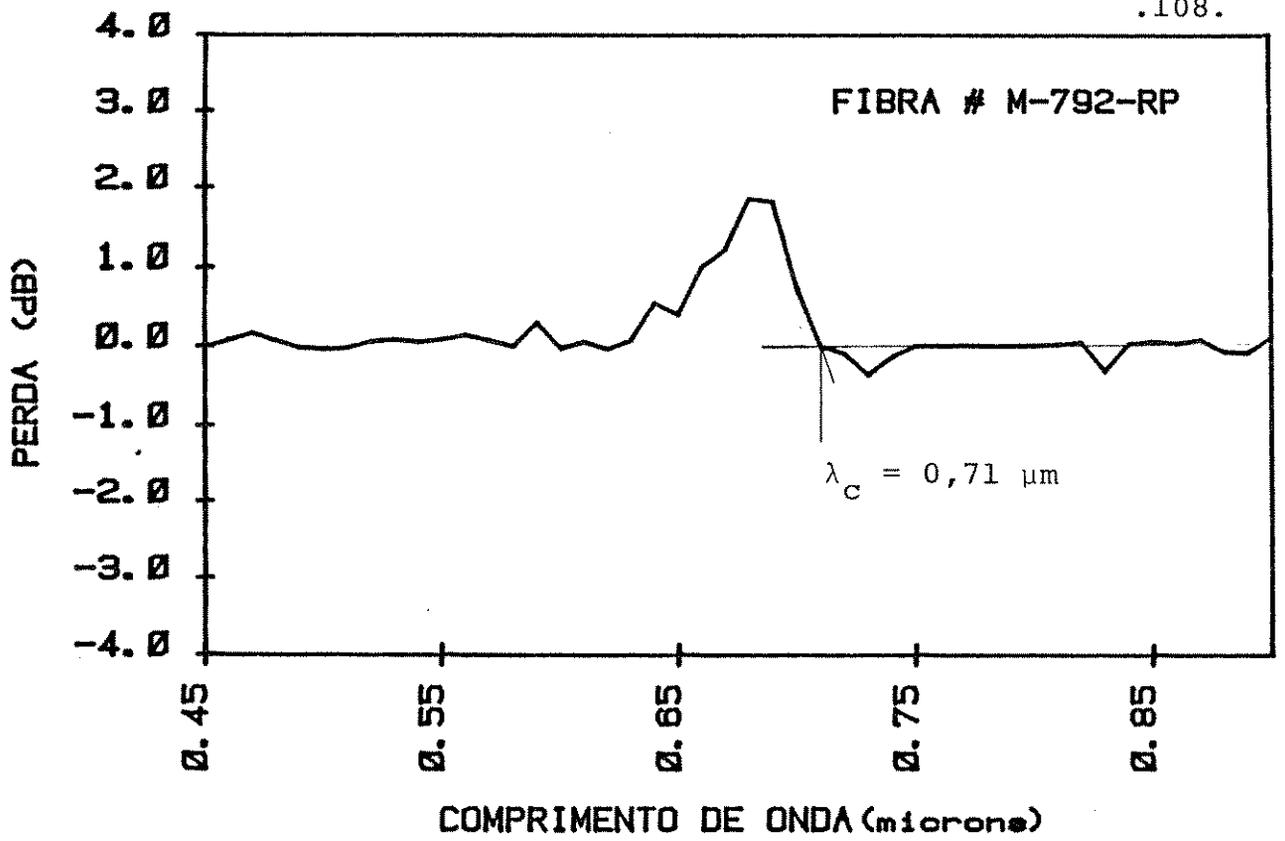


a) Fibra M-788-RP

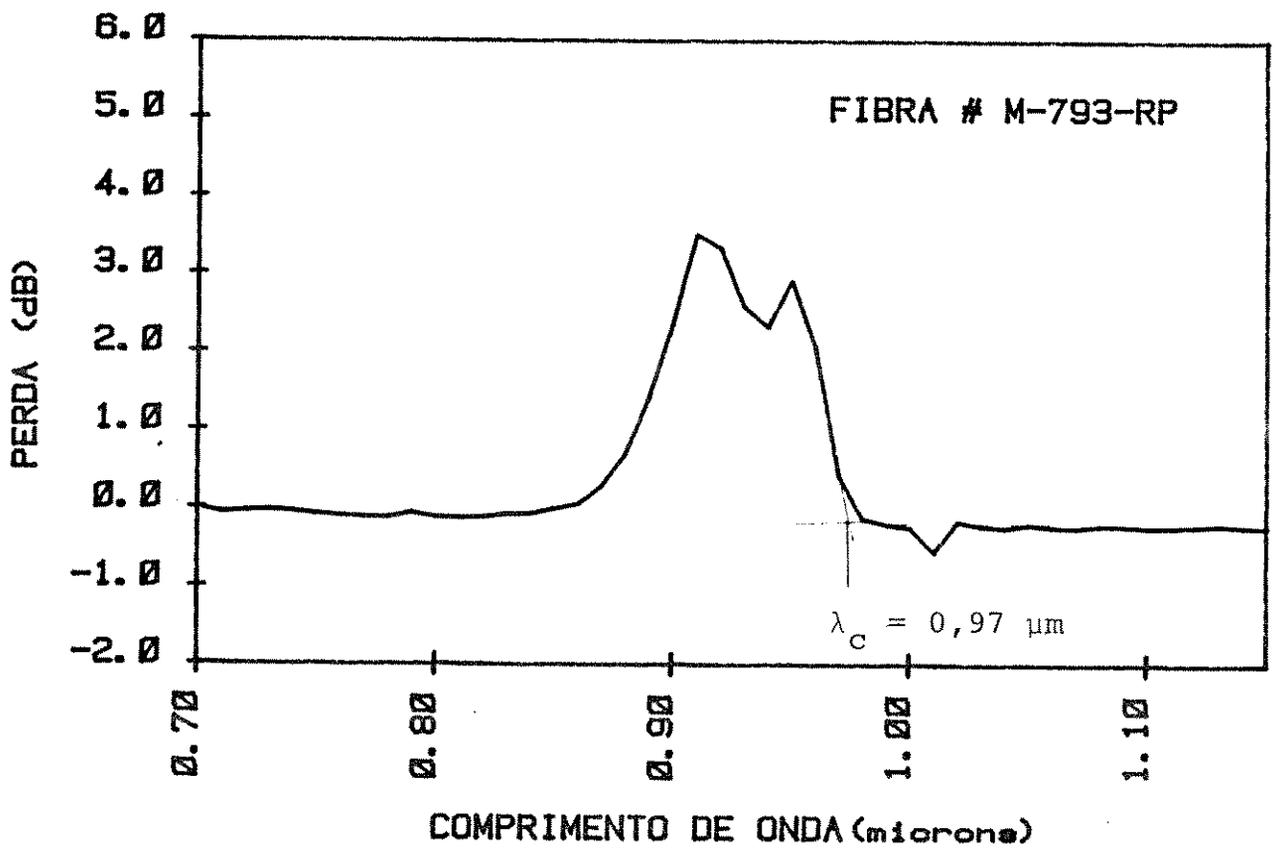


b) Fibra M-789-RP

FIG. 6.6 - Comprimento de onda de corte do modo LP_{11} .



a) Fibra M-792-RP



b) Fibra M-793-RP

FIG. 6.7 - Comprimento de onda de corte do modo LP_{11} .

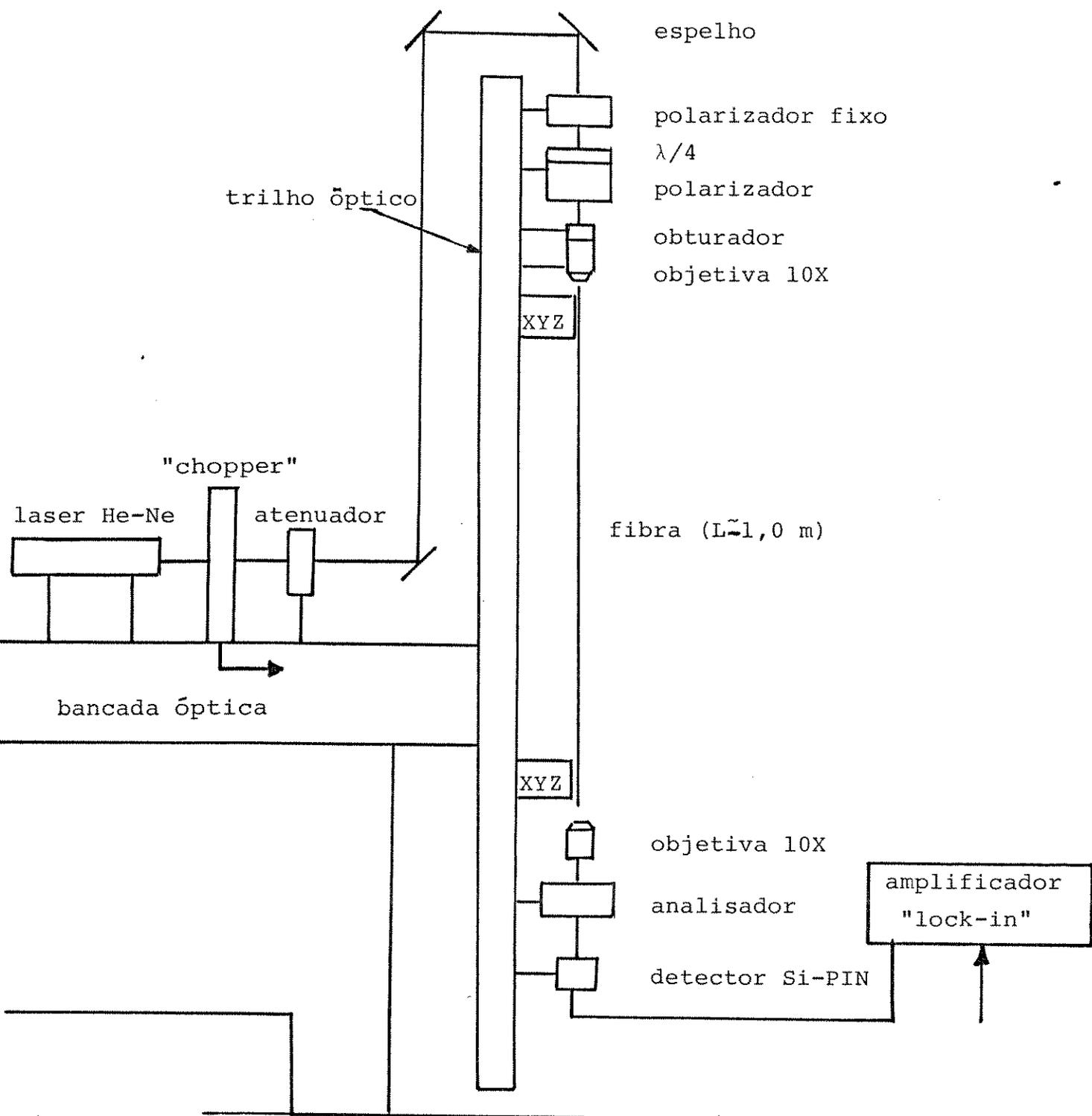


FIG. 6.8 - Montagem esquemática utilizada na medida do retardo nas fibras de baixa birrefringência obtidas por rotação da preforma.

que o feixe do laser de He-Ne ($\lambda = 6328 \text{ \AA}$), depois de atravessar o "chopper", usado na modulação da luz, e um atenuador variável, fosse direcionado até o topo do banco óptico por um sistema de espelhos.

Devido ao uso dos espelhos e do atenuador, este necessário à diminuição da intensidade do laser para que não saturasse o detector, foi colocado um primeiro polarizador que assegurava um alto grau de polarização neste ponto. A incidência desta luz, linearmente polarizada, na placa de $\lambda/4$, com um ângulo $\theta = 45^\circ$, isto é, o ângulo entre o plano do vetor campo elétrico e a direção do eixo óptico do retardador, ocorre uma transformação da polarização da luz de linear para circularmente polarizada. Em seguida a polarização da luz é novamente modificada para linear após passar pelo segundo polarizador. Nestas condições foi possível lançar na fibra uma luz linearmente polarizada, de mesma intensidade, em qualquer ângulo azimutal dado pela direção do plano de polarização do segundo polarizador.

Um obturador de diâmetro variável foi colocado antes da objetiva de 10x, usada para lançamento da luz na fibra, o obturador foi utilizado na redução do diâmetro do feixe do laser como também no alinhamento do feixe óptico. Durante o alinhamento, o obturador com diâmetro de 3 mm foi movimentado ao longo do banco óptico e através de ajustes nos espelhos foi possível definir um eixo óptico de altura constante e paralelo ao banco óptico.

As fibras utilizadas nesta medida consistiam de pedaços de aproximadamente 1,0 metro de comprimento e que se mantiveram retas ao longo do banco óptico.

No final da fibra uma objetiva de 10x colimava o feixe e este, depois de atravessar o analisador, incidia em um detector Si-PIN 10DP da UDT, ligado a um amplificador "lock-in", onde eram feitas as leituras dos valores obtidos.

O plano de polarização do segundo polarizador e do analisador foram ajustados de modo a ficarem no mesmo plano.

Com os dois procedimentos utilizados para fixar a fibra nos posicionadores XYZ, não se introduziu birrefringência devido à pressão. No primeiro deles utilizou-se uma fita adesiva que levemente prendia a fibra em uma ranhura de aproximadamente 0,15 mm. Neste procedimento, tanto no início como no final da fibra havia a necessidade de se usar a fita adesiva. No segundo foram utilizadas duas agulhas hipodérmicas de diâmetro interno de 0,5 mm e comprimento de 5 cm, presa no XYZ. A fibra era então enfiada na agulha, depois clivada, e usando-se uma cola de silicone a fibra era fixada no XYZ superior onde era feito o lançamento. A fibra, ao seu final, ficava livre, pois atravessava somente a agulha, já que devido ao seu comprimento e como o revestimento primário da fibra era da ordem de 250 μm a liberdade de movimento era pequena, mas suficiente para a estabilização no posicionamento.

Para uma melhor caracterização da montagem óptica utilizada, e devido aos baixos valores de retardo a serem medidos (da ordem de 1°), correspondendo a um grau de polarização $P > 0,999$, a faixa dinâmica necessária quando da medida da intensidade máxima e mínima (I_{max} e I_{min}) era da ordem de 40 dB. Para isso foi feita uma calibração nesta montagem com o auxílio de alguns atenuadores ópticos conhecidos, e o sistema se mostrou linear nas medições nessa

faixa, além de que na própria especificação do detector era garantido pelo fabricante uma linearidade de 70 dB dentro dos níveis de potência óptica que foram usados.

Para se obter uma melhor avaliação do sistema utilizado, foi medido o grau de polarização ao longo de todo o sistema óptico sem fibra. Para isso as duas objetivas de 10 x foram colocadas em montagem confocal, sendo que os valores medidos para várias posições angulares do segundo polarizador ficaram em torno de $P = 0,9996$, correspondendo a valores de retardo de aproximadamente $1,5^\circ$ sendo este, portanto, o limite prático da medida, apesar de os componentes ópticos utilizados serem de ótima qualidade.

A influência externa na birrefringência da fibra foi comprovada fazendo as seguintes medidas, cujos resultados estão nas Figs. 6.9 e 6.10. Nessas figuras, apresentam-se as medidas do grau de polarização na saída da fibra quando da variação do ângulo de incidência da luz linearmente polarizada, na fibra M-785-RP. Na Fig. 6.9 vê-se o resultado da medida feita em 1 km de fibra enrolada na bobina com raio de 16,5 cm. A variação que pode ser notada no grau de polarização é atribuída à curvatura e pressão atuantes sobre a fibra e criadas durante o embobinamento. Mantendo as condições de lançamento, a fibra foi cortada para um comprimento de 3m com apenas uma volta na bobina para verificação do efeito na birrefringência. Nesse caso, o grau de polarização foi maior que 0,99 para qualquer ângulo de incidência, conforme pode ser observado nos pontos em cruz na parte superior da Fig. 6.9.

Já na Fig. 6.10, o resultado do mesmo pedaço de fibra de 3 metros com o mesmo raio de 16,5 cm da bobina, foi colocado correspondendo aos pontos em cruz. A fibra que estava com uma volta na bobina foi retirada e introduziu-se um raio de curvatura de

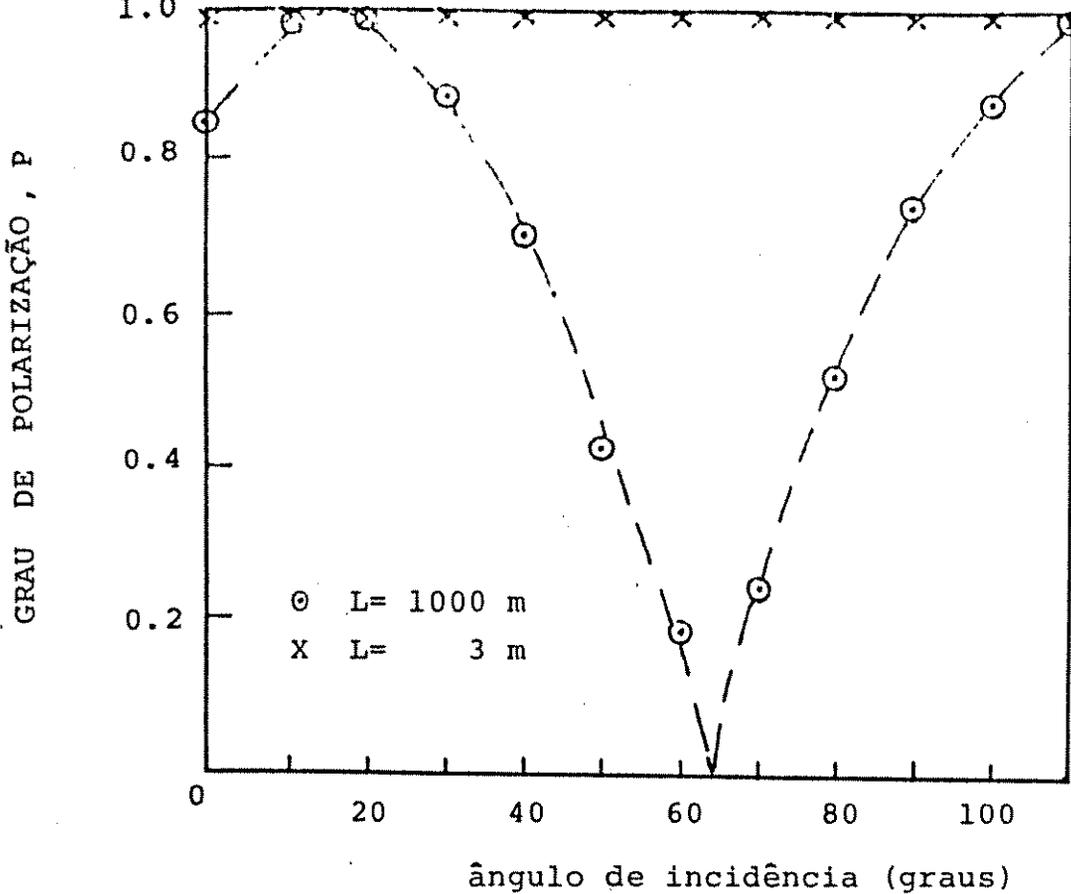


FIG. 6.9 - Relação entre o grau de polarização P, e o ângulo de incidência da polarização, para dois comprimentos da fibra M-785-RP enrolada em uma bobina de raio 16,5 cm.

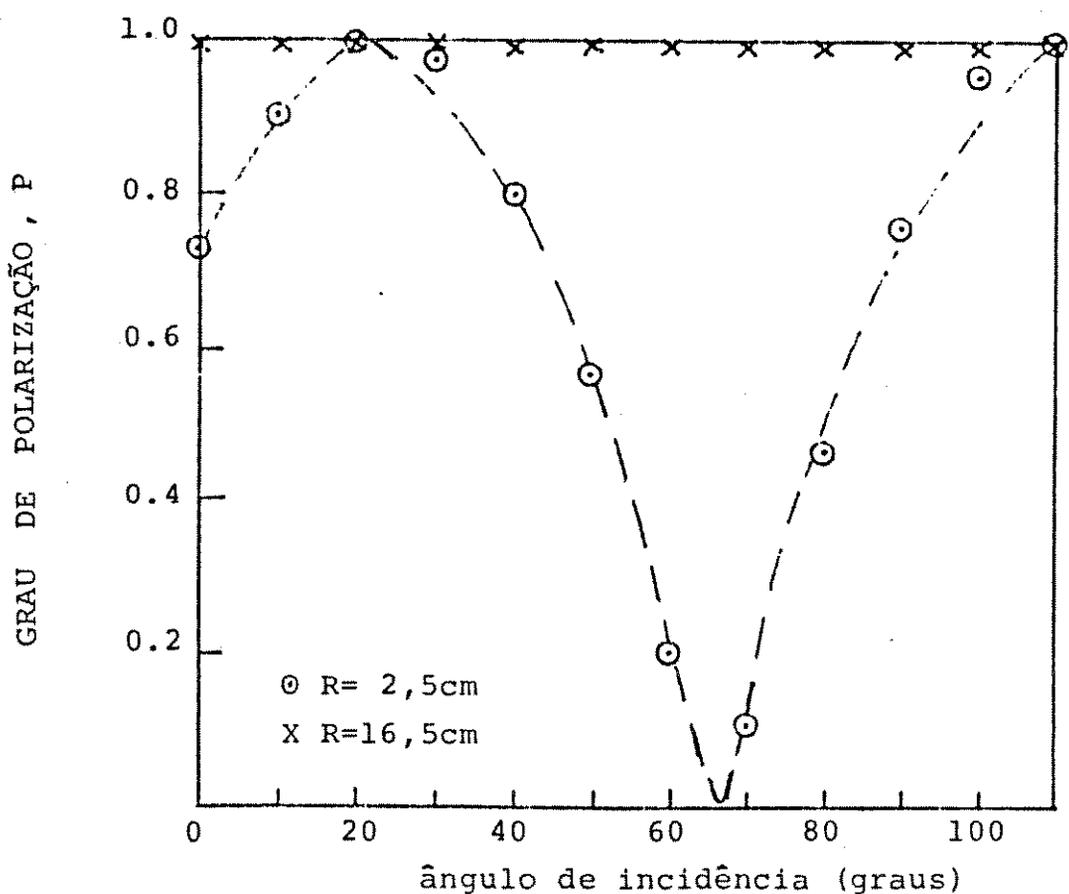


FIG. 6.10 - Relação entre o grau de polarização P e o ângulo de incidência da polarização em função do raio R na fibra M-785-RP de 3 metros de comprimento.

2,5 cm e novamente a forte influência da curvatura fez o grau de polarização variar significativamente. Fica evidenciado, portanto, a necessidade das precauções aqui tomadas para evitar birrefringência externa nesses tipos de medidas.

Utilizando-se desta montagem, as fibras monomodos fabricadas por rotação da preforma (RP) e as regiões destas feitas por puxamento normal (NO) foram caracterizadas visando obter o retardo por elas apresentado. Nesse procedimento, as fibras de aproximadamente 1 metro de comprimento foram cuidadosamente colocadas e alinhadas, evitando-se qualquer introdução de birrefringência externa.

As primeiras medidas foram feitas na região da fibra onde o puxamento foi normal, isto é, sem girar a preforma. O retardo esperado, nessas fibras, era maior que $60^\circ/\text{m}$ que corresponde a um comprimento de batimento $L_b < 6 \text{ m}$ e, no comprimento de onda $\lambda = 0,633 \text{ }\mu\text{m}$, a uma Birrefringência Modal de $1,05 \times 10^{-7}$.

Para esta medida foi utilizado o procedimento do método de corte, descrito no Capítulo 3. Primeiro deve-se encontrar o eixo principal da fibra, depois o polarizador é girado em 45° para excitar igualmente os dois modos ortogonais, e, então, mede-se o grau de polarização. Depois, sem mexer nas condições de lançamento, a fibra foi sendo cortada em pedaços conhecidos e o grau de polarização sendo medido. Dessa maneira esperava-se que a variação do grau de polarização seguisse a expressão teórica da Eq. 3.17, $P = |\cos \delta|$. Isto não se verificou e várias mudanças foram feitas na montagem óptica, bem como no sistema de fixação da fibra, sem que nenhuma melhora fosse notada.

A partir de então o grau de polarização foi medido, em cada comprimento de fibra, variando o ângulo de incidência de 10° em 10° , numa faixa de 180° , para poder visualizar o que ocorria. Na Fig. 6.11 são mostrados os resultados obtidos na fibra M-785-NO quando da variação do comprimento da fibra e mantendo a extremidade da fibra onde é feito o lançamento sem alteração. Vê-se que a fibra não tem um eixo principal bem definido como ocorre com as fibras de alta birrefringência; isto é devido à não homogeneidade da birrefringência ao longo da fibra.

As fibras M-784, M-785 e M-788 que possuem comprimentos de onda de corte menor que $0,63\mu\text{m}$ foram então caracterizadas.

Na Fig. 6.12 é mostrada a variação do grau de polarização em função do ângulo de incidência da luz linearmente polarizada para a fibra M-785-RP e comprimento $L = 1,15\text{m}$ comparado com a M-785-NO e $L = 0,96\text{m}$. Os resultados obtidos nas fibras M-788 e M-784 são mostrados nas Figs. 6.14 e 6.16. As fibras fabricadas por rotação da preforma (RP) apresentam um alto grau de polarização ($P > 0,99$) independentemente do ângulo de incidência da luz linearmente polarizada. Além disso, o plano de polarização se mantém ao longo da fibra, isto é, o plano do vetor campo elétrico do laser, dado pelo plano de polarização do polarizador, permanece o mesmo, pois na saída da fibra ele estava coincidente com o plano de polarização do analisador.

Por outro lado, as regiões das fibras onde não houve rotação da preforma, apresentam uma variação no grau de polarização em função do ângulo de incidência, significando uma diferença de fase maior, devido à birrefringência na fibra.

A partir desses resultados e com a realização de novas medidas em função do comprimento da fibra, foi possível traçar os

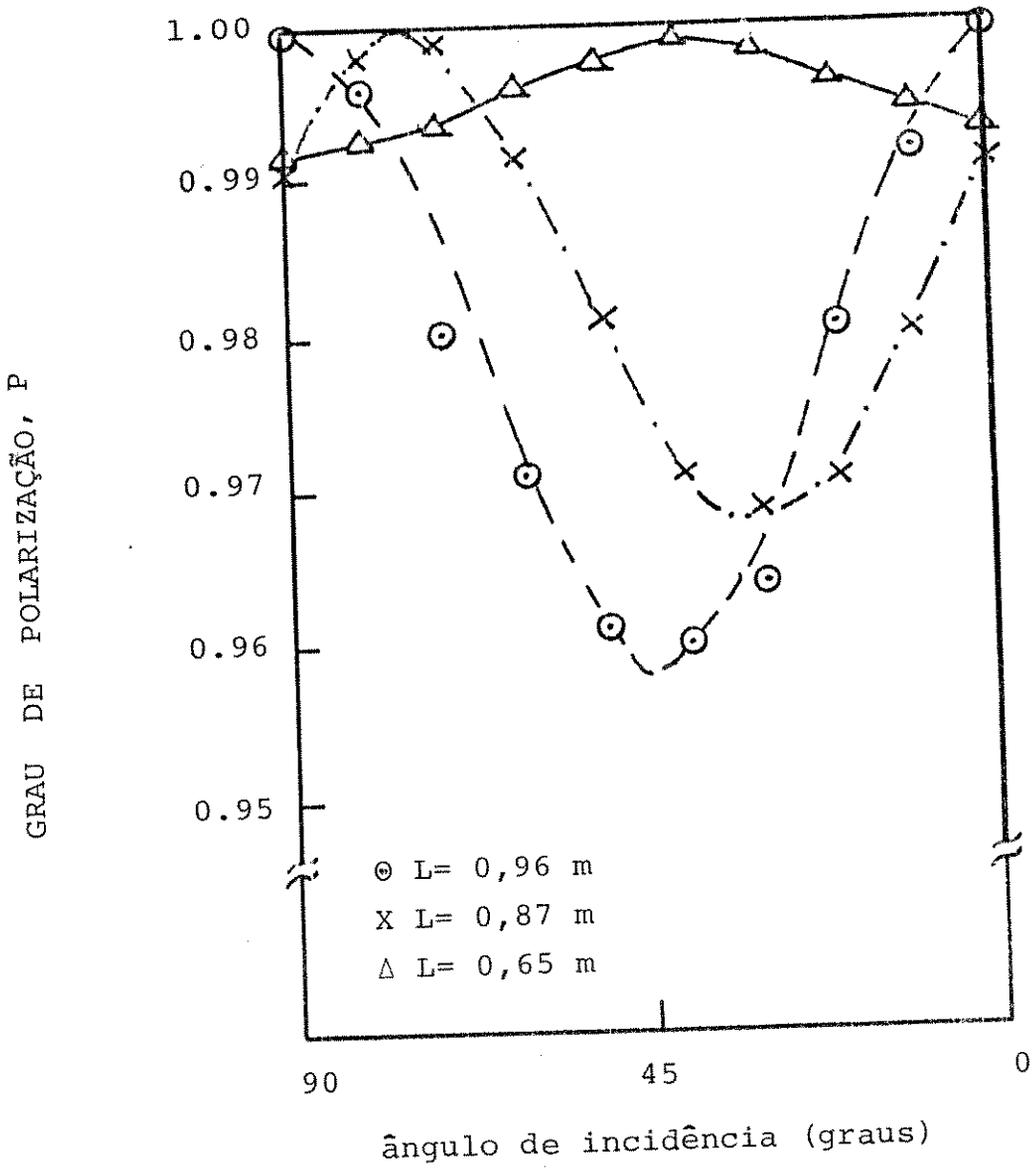


FIG. 6.11 - Relação entre o grau de polarização P de um laser de He-Ne ($\lambda = 6328 \text{ \AA}$) na saída da fibra (M-785-NO) e o ângulo de incidência da polarização para vários comprimentos da mesma fibra.

gráficos das figuras 6.13, 6.15 e 6.17. Nestas figuras cada ponto representa o valor do retardo calculado através da expressão $\delta = \cos^{-1}(P)$ e do grau de polarização na saída da fibra, quando este tivesse um mínimo. Por exemplo na Fig. 6.12, para a fibra M-785-NO ($L=0,96m$), o grau de polarização mínimo foi de $P=0,96$, o que corresponde a um valor de retardo de $16,2^\circ$. Já na fibra M-785-RP ($L=1,15m$) com $P=0,998$ o valor encontrado do retardo foi de $3,6^\circ$.

O retardo de $1,5^\circ$, colocado no eixo da ordenada, corresponde ao valor efetivo lançado na fibra, como foi visto anteriormente. Não foram feitas medidas de retardo para comprimentos de fibra menores que $0,6m$ devido à presença de luz de casca.

No Capítulo 3 foi demonstrada a impossibilidade de se calcular o retardo por metro em uma fibra a partir de uma única medida, devido à natureza periódica da função cosseno; apesar disso, na Figura 6.17 é mostrado o resultado da fibra M-784-NO em que foi realizada apenas uma única medida. No entanto, devido às condições semelhantes das fibras utilizadas e dos valores de retardo obtidos nas fibras M-785-NO e M-788-NO, assumiu-se o mesmo comportamento do retardo nesta fibra.

As retas traçadas nas Figs. 6.13, 6.15 e 6.17 representam o ajuste feito por mínimos quadrados, e a partir delas, são obtidos os valores de retardo nas fibras caracterizadas. Os retardos, em graus por metro, são mostrados na Tabela 6.3 descontando-se o valor de $1,5^\circ$ correspondente ao retardo do lançamento; além disso são também mostrados os valores da Birrefringência Modal e do comprimento de batimento no comprimento de onda de $\lambda=6328 \text{ \AA}$ utilizado durante as medidas.

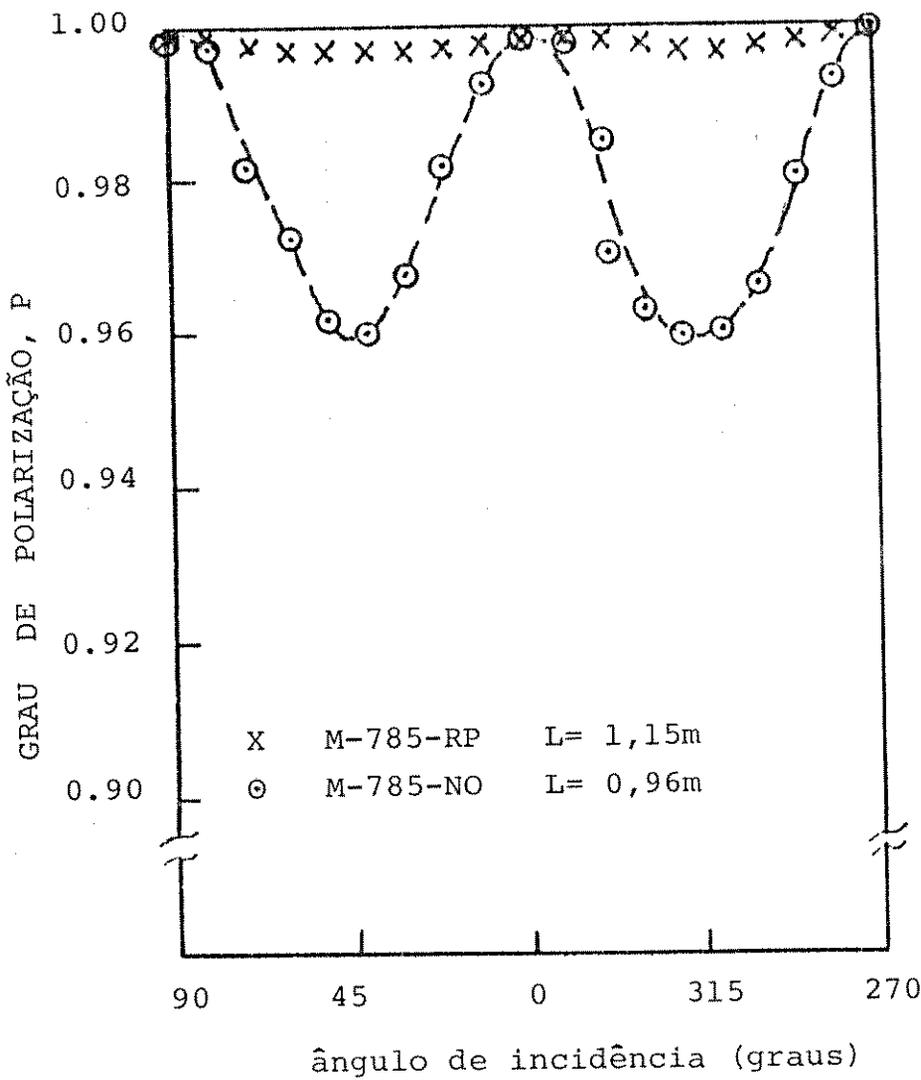


FIG. 6.12 - Relação entre o grau de polarização e o ângulo de incidência da polarização nas fibras M-785-RP e M-785-NO.

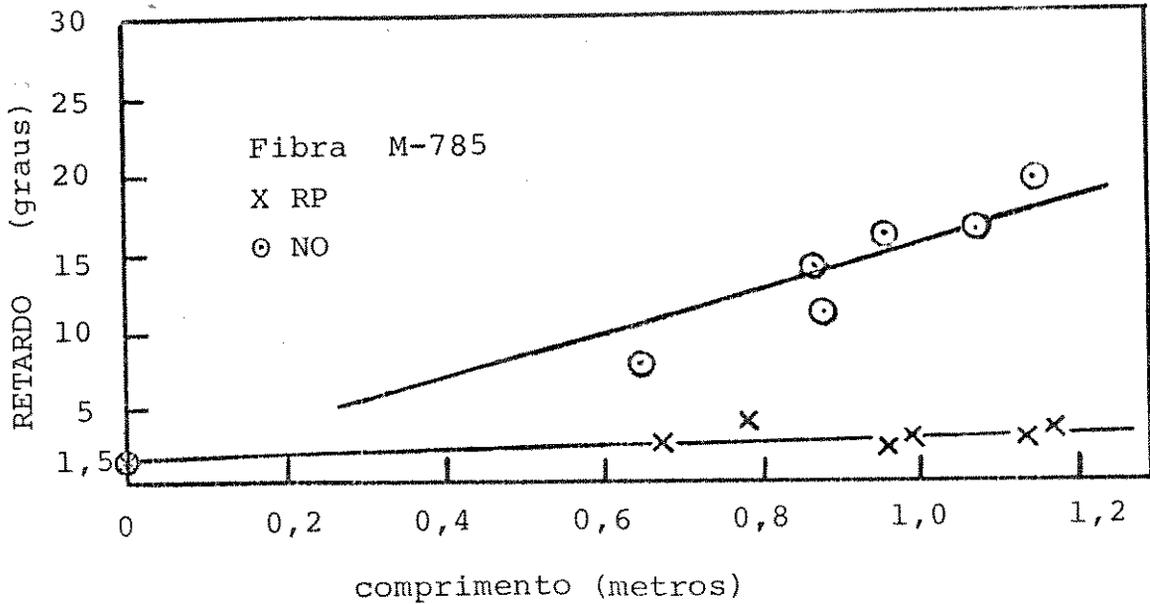


FIG. 6.13 - Relação entre o retardo e a redução no comprimento das fibras M-785-RP e M-785-NO

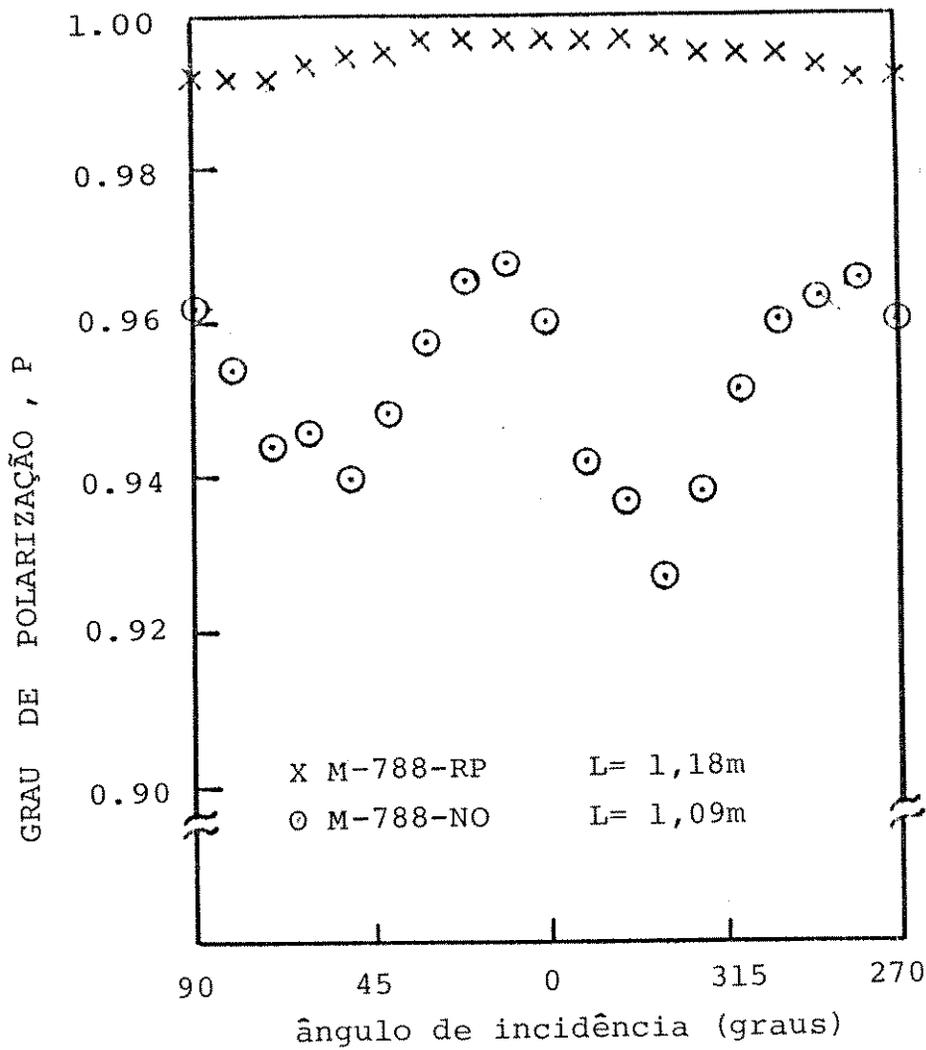


FIG. 6.14 - Relação entre o grau de polarização e o ângulo de incidência da polarização nas fibras M-788-RP e M-788-NO.

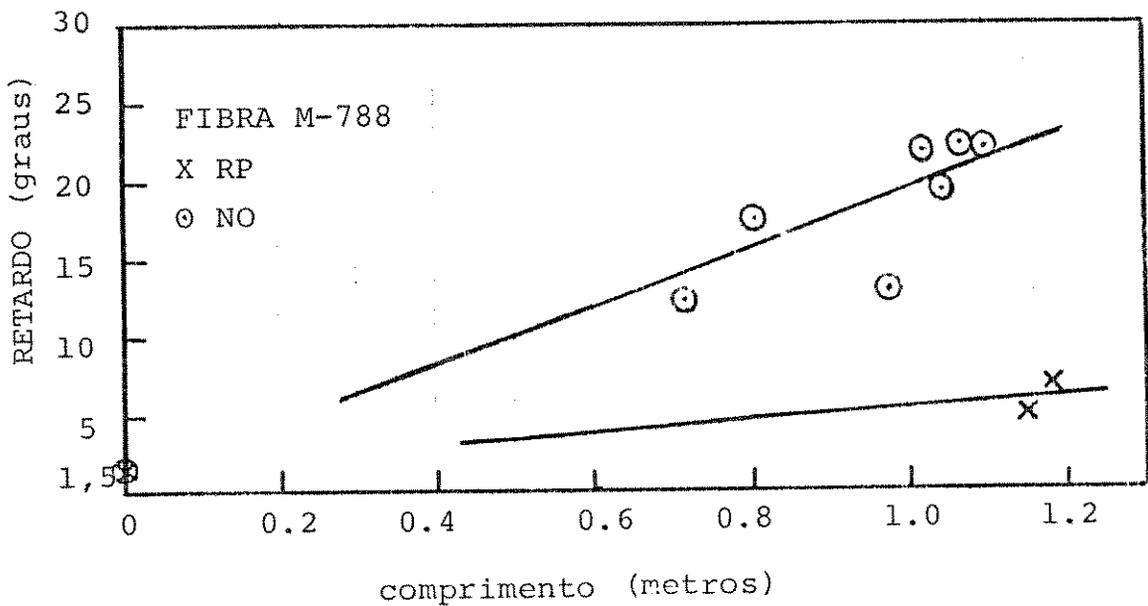


FIG. 6.15 - Relação entre o retardo e a redução no comprimento das fibras M-785-RP e M-785-NO.

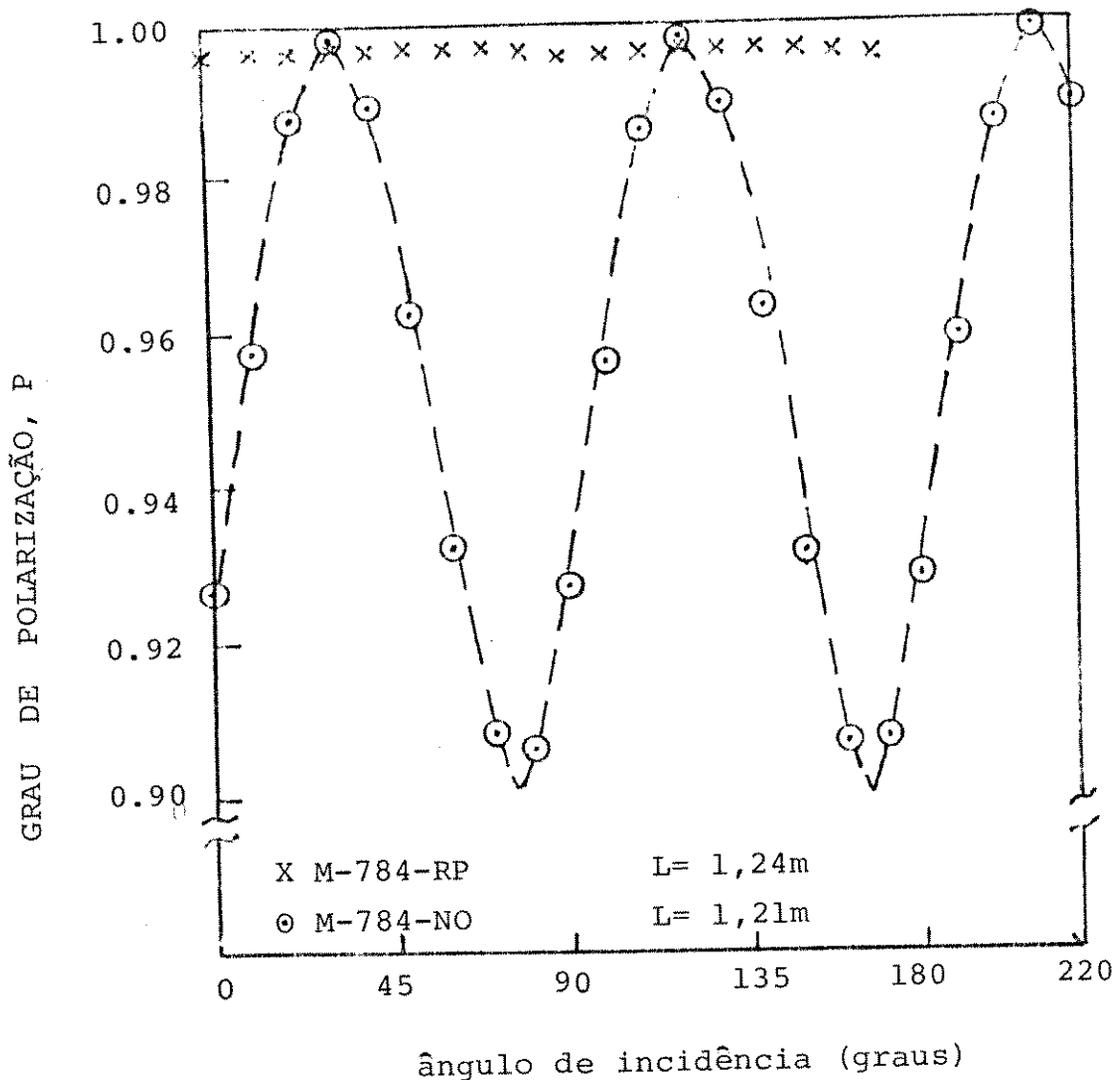


FIG. 6.16 - Relação entre o grau de polarização e o ângulo de incidência da polarização nas fibras M-784-RP e M-784-NO.

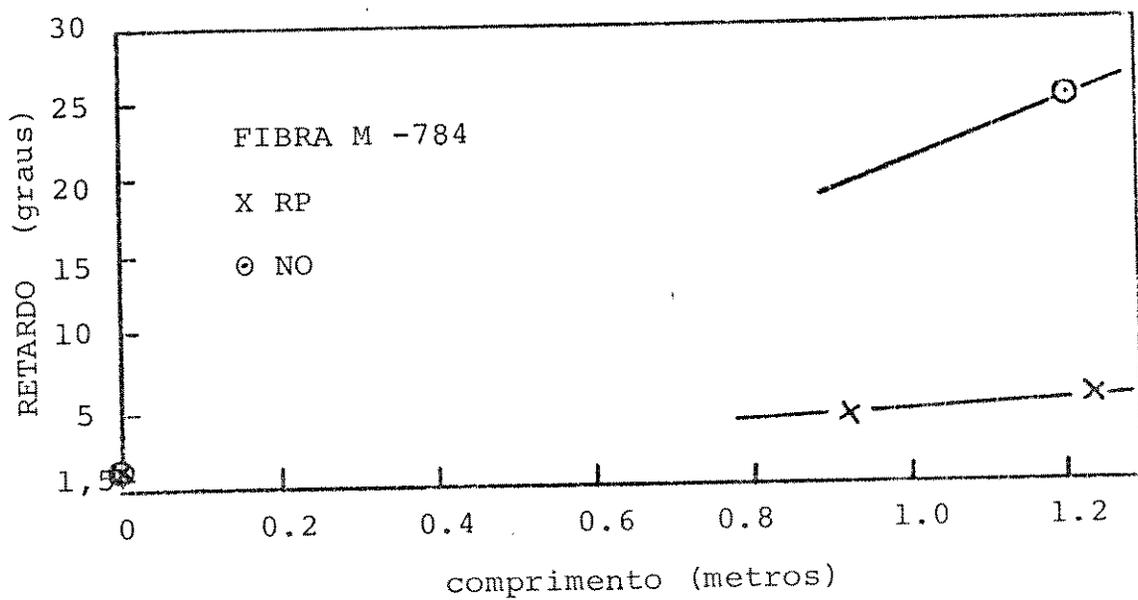


FIG. 6.17 - Relação entre o retardo e a redução no comprimento

Tabela 6.3 - Valores da birrefringência nas fibras monomodo obtidas

FIBRA	Processo	Retardo °/m	L_b (m) ($\lambda=6328\text{\AA}$)	B $\times 10^{-9}$
M-784	RP	3,2	112,5	5,6
	NO	19,4	18,5	34,2
M-785	RP	1,7	211,8	3,0
	NO	14,0	25,7	24,6
M-788	RP	4,0	90,0	7,0
	NO	17,9	20,1	31,4

Pelos resultados nas fibras feitas com puxamento normal, vê-se que os valores de birrefringência já estavam baixos. Isto é devido à boa qualidade dos tubos utilizados e também pelo baixo valor da diferença de índice de refração necessário para que o comprimento de onda de corte fosse menor que $0,63\mu\text{m}$. Esses valores também concordam com o valor estimado no Capítulo 4 de $B < 2,6 \times 10^{-7}$ para essas fibras.

Concluindo, vemos que as fibras monomodo fabricadas por puxamento normal não possuem eixos principais tão bem definidos como as fibras de alta birrefringência, e apresentam uma birrefringência não homogênea ao longo da fibra.

As fibras fabricadas por rotação da preforma apresentaram uma birrefringência uniforme em qualquer direção azimutal, além de reduzir a birrefringência intrínseca da fibra a níveis bem baixos. Com isso a fabricação de fibras com baixa bir-

refringência pelo método da rotação da preforma se mostrou prático e eficiente, já que não são necessárias grandes modificações na estrutura da torre de puxamento.

CAPÍTULO 7 - CONCLUSÕES

Neste trabalho, procurou-se identificar os mecanismos responsáveis pela introdução da birrefringência em fibras ópticas monomodo.

Através das medidas do grau de polarização, na saída de uma fibra óptica monomodo de alta birrefringência, em função da variação do ângulo de incidência de uma luz linearmente polarizada, confirmou-se a existência de dois eixos principais ortogonais entre si, onde a polarização é mantida ao longo do comprimento da fibra.

A partir da utilização de três métodos de medidas, os quais cobriam todo o intervalo de Birrefringência Modal ($10^{-3} > B > 10^{-9}$) existentes em fibras ópticas monomodo, foram feitas as montagens ópticas necessárias para a caracterização do comprimento de batimento. Dos métodos utilizados, o método do espalhamento Rayleigh é o de maior simplicidade, sendo, entretanto, limitado para comprimentos de onda menores que $1,0 \mu\text{m}$ devido à dependência com λ^{-4} do espalhamento Rayleigh. Esse método necessita, também, de laser de alta potência ($P > 50 \text{ mW}$) para a visualização do batimento na região do visível, ou de montagens especiais com detector quando o laser for de baixa potência ou quando a medição envolver a região entre $0,7$ e $1,0 \mu\text{m}$. Devido à dificuldade na definição das regiões de mínimo espalhamento, este método fica restrito à medida no comprimento de batimento no intervalo entre 1mm e 10cm [38].

O método de varredura em frequência necessita de um cuidadoso alinhamento óptico na montagem experimental, mas com este método é possível medir a birrefringência em um grande intervalo de frequência (comprimento de onda) em fibras ópticas de alta birrefringência com comprimento de batimento menor que $0,5\text{m}$ [39].

O método do corte, por outro lado é útil para medir comprimento de batimento maior que 20mm, não sendo utilizado para comprimento de batimento menores devido à dificuldade prática em cortar a fibra em pedaços milimétricos. Apresenta o inconveniente de ser um método destrutivo.

As fibras ópticas monomodo de alta birrefringência apresentaram a capacidade de manter uma polarização linear ao longo de seu comprimento e poderá ser a solução para os problemas das flutuações do estado de polarização, causado por perturbações mecânicas e térmicas, na detecção óptica heteródina/homódina em um Sistema de Comunicação Óptica Coerente |40|.

Um dos principais objetivos deste trabalho foi conseguido, com a fabricação das fibras ópticas monomodo de baixa birrefringência. O método utilizado, de rotação da preforma, é prático e não necessita de grandes mudanças no processo de fabricação das fibras ópticas monomodo atualmente utilizadas em telecomunicações. Pelos resultados apresentados o método mostrou-se eficiente e reprodutivo.

A fibra óptica monomodo de baixa birrefringência tem a vantagem de manter o estado de polarização ao longo de seu comprimento, para qualquer ângulo azimutal de lançamento da luz linearmente polarizada.

Cuidados especiais devem ser tomados quando de sua utilização para não introduzir birrefringência externa, já que estas fibras são mais sensíveis à curvaturas, pressão, campo magnético, etc., ficando a caracterização da mudança do estado de polarização em função desses mecanismos para trabalhos futuros.

Em aplicações de sensores, onde o estado de polarização na saída da fibra é utilizado para medir a magnitude do efeito externo, a birrefringência interna das fibras convencionais pode interferir no resultado a ser obtido. Nestes casos a fibra de baixa birre-

fringência é vantajosa. A sua utilização em dispositivos a fibra, como em isoladores ópticos, é também requerida ^[11]. Além disso as fibras ópticas monomodo de baixa birrefringência, projetadas para terem dispersão cromática nula, serão úteis em sistemas de comunicações com ultra alta taxa de transmissão devido a baixa dispersão de polarização dessas fibras ^[3].

B I B L I O G R A F I A

1. T. OKOSHI, "Heterodyne and Coherent Optical Fiber Communications: Recent Progress", IEEE Trans. on Microwave Theory and Techniques, Vol.MTT-30, n^o 8, pp.1138-1148, 1982.
2. I.P.KAMINOW, "Polarization in Optical Fibers", IEEE Journal of Quantum Electronics, Vol.QE-17, n^o 1, pp.15-22, 1981.
3. D.N.PAYNE, A.J.BARLOW, J.J.RAMSKOV-HANSEN, "Development of Low-and High-Birefringence Optical Fibers", IEEE Journal of Quantum Electronics, Vol.QE-18, n^o 4, pp.477-488, 1982.
4. LUC B.JEUNHOMME, Single-Mode Fiber Optics:Principles and Applications, Marcel Dekker, Inc.New York, 1983.
5. T. OKOSHI, Optical Fibers, Academic Press, Inc. New York, 1982.
6. A.YARIV, Optical Electronics, CBS College Publishing, 3^a Ed., New York, 1985.
7. H.MUELLER, "The Theory of Photoelasticity", Journal Am. Ceramic Soc., Vol.21, pp.27-33, 1938.
8. E.B.SHAND, Glass Engineering Handbook, Mc Graw-Hill Book Co., 2^a Ed, New York, 1958.
9. J.SAKAI, T.KIMURA, "Birefringence and Polarisation Characteristics of Single-Mode Optical Fibers under Elastic Deformations", IEEE Journal of Quantum Electronics, Vol.QE-17, n^o 6, pp.1041-1051, 1981.

10. I.P.KAMINOW, V.RAMASWAMY, "Single-Polarization Optical Fibers: Slab Model", Appl.Phys.Lett., Vol.34, n^o 4, pp.268-270, 1979.
11. J.NODA, K.OKAMOTO, Y.SASAKI, "Polarisation Maintaining Fibers and their Applications", Journal of Lightwave Technology, Vol.LT-4, n^o 8, pp.1071-1089, 1986.
12. S.C.RASHLEIGH, "Origins and Control of Polarization Effects in Single-Mode Fibers", Journal of Lightwave Technology, Vol. LT-1, n^o 2, pp.312-331, 1983.
13. J.D.LOVE, R.A.SAMMUT, A.W.SNYDER, "Birefringence in elliptically deformed optical fibers", Electronics Letters, Vol.15, n^o 20, pp.615-616, 1979.
14. R.B.DYOTT, J.R.COZENS, D.G.MORRIS, "Preservation of polarisation in optical fibre waveguides with elliptical cores", Electronics Letters, Vol.15, n^o 13, pp.380-382, 1979.
15. S.R.NORMAN, D.N.PAYNE, M.J.ADAMS "Fabrication of Single-mode fibres exhibiting" , Electronics Letters, Vol.15, n^o 11, pp.309-311, 1979.
16. J.B.MacCHESNEY, "Material and Process for Preform Fabrication - Modified Chemical Vapor Deposition and Plasma Chemical Vapor Deposition", Proc. IEEE, Vol.68, n^o 10, pp.1181-1184, 1980.
17. V.RAMASWAMY, R.H.STOLEN, M.D.DIVINO, W.PLEIBEL, "Birefringence in elliptically clad borosilicate single-mode fibers", Applied Optics, Vol.18, n^o 24, pp.4080-4084, 1979.
18. H.SUGANUMA, T.MYOGADANI, H.YOKOTA, "Characteristics of side-tunnel single-polarization optical fiber", IOOC-ECOC'85, pp.139-141, 1985.

19. R.H.STOLEN, W.PLEIBEL, J.R.SIMPSON, "High-birefringence optical fibers by preform deformation", Journal of Lightwave Technology, Vol.LT-2, n^o 5, pp.639-641, 1984.
20. T.IZAWA, N.INAGAKI, "Materials and Processes for Fiber Preform Fabrication-Vapor-Phase Axial Deposition", Proc.IEEE, Vol. 68, n^o 10, pp.1184-1187, 1980.
21. T.HOSAKA, Y.SASAKI, J.NODA, M.HORIGUCHI, "Low-Loss and Low crosstalk polarisation-maintaining optical fibres", Electronics Letters, Vol.21, n^o 20, pp.920-921, 1985.
22. R.D.BIRCH, D.N.PAYNE, M.P.VARNHAM, "Fabrication of Polarisation-maintaining fibres using gas-phase etching", Electronics Letters, Vol.18, n^o 24, pp.1036-1038, 1982,
23. A.PAPP, H.HARMS, "Polarization optics of index-gradient optical waveguide fibers", Applied Optics, Vol.14, n^o 10, pp.2406-2411, 1975.
24. V.RAMASWAMY, R.D.STANDLEY, D.SZE, W.G.FRENCH, "Polarization Effects in short length, Single-Mode Fibers", The Bell System Technical Journal, Vol.57, n^o 3, pp.635-651, 1978.
25. K.OKAMOTO, Y.SASAKI, T.MIYA, M.KAWACHI, T.EDAHIRO, "Polarisation characteristic in long length V.A.D.single-mode fibres", Electronics Letters, Vol.16, n^o 20, pp. 768-769, 1980.
26. G.R.FOWLES, Introduction to modern optics, 2^a Ed.,USA,1975.
27. F.A.JENKINS, A.E.WHITE, Fundamentals of Optics, McGraw-Hill Book Company, Inc., 3^a Ed., New York, 1957.

28. M.MONERIE, F.ALARD, "Birefringence and polarisation dispersion measurements in high-birefringence single-mode fibres", Electronics Letters, Vol.23, n° 5, pp.198-199, 1987.
29. K.KIKUCHI, T.OKOSHI, "Wavelength-Sweeping technique for measuring the beat length of linearly birefringent optical fibers ", Optics Letters, Vol.8, n° 2, pp.122-123, 1983.
30. S.C.RASHLEIGH, "Wavelength dependence of birefringence in highly birefringent fibers", Optics Letters, Vol.7, n° 6, pp.294-296, 1982.
31. F.P.KAPRON, N.F.BORRELLI, D.B.KECK, "Birefringence in Dielectric Optical Waveguides", IEEE Journal of Quantum Electronics, Vol.QE-8, n° 2, pp.222-225, 1972.
32. T.HOSAKA, K.OKAMOTO, Y.SASAKI, T.EDAHIRO, "Single-mode fibres with asymmetrical refractive index pits on both sides of core", Electronics Letters, Vol.17, n° 5, pp.191-193, 1981.
33. TINGYE LI, Optical Fiber Communications - Fiber Fabrication, Academic Press, Inc, Orlando, USA, 1985.
34. A.J.BARLOW, D.N.PAYNE. M.R.HADLEY, R.J.MANSFIELD, "Production of single-mode fibres with negligible intrinsic birefringence and polarisation mode dispersion", Electronics Letters, Vol.17, n° 20, pp.725-726, 1981.
35. S.GECKELER, "Simple Field Calculation for monomode optical waveguides", Electronics Letters, Vol.18, n° 15, pp.683-684, 1982.
36. GERD KEISER, Optical Fiber Communication, McGraw-Hill, Inc, 1983.

37. A.J.BARLOW, J.J.RAMSKOV-HANSEN, D.N.PAYNE, "Birefringence and polarisation mode-dispersion in spun single-mode fibers", Applied Optics, Vol.20, nº 17, pp.2962-2968, 1981.
38. D.C.DINI, E.CONFORTI, "Medidas do grau de polarização e do comprimento de batimento em fibras ópticas de casca elíptica", Anais do III Simpósio Brasileiro de Microondas - pp.303-308, julho 1988.
39. D.C.DINI, E.CONFORTI, J.B.M.A.NETO, "Medida do comprimento de batimento em fibras ópticas monomodo de alta birrefringência pelo método da varredura em frequência", Anais do 6º Simpósio Brasileiro de Telecomunicações , pp.135-139, setembro 1988.
40. T.OKOSHI, "Polarization-state control schemes for Heterodyne or Homodyne Optical Fiber Communications", Journal of Lightwave Technology, Vol.LT-3, nº 6, pp.1232-1237, 1985.